

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
П.А. РЫМКЕВИЧ
[REDACTED]

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ

1 9 3
ГОСУДАРСТВЕННОЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО

7355

Проф. П. А. РЫМКЕВИЧ

ДЕП

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ

1/305365

ПОЛУЧЕНО
17.3.41

1955
ПЕЧАТНО



1 9 3 1
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА ★ ЛЕНИНГРАД

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА



2248

НТ, 1. Огиз № 551.
Ленинградский Областной № 13603.
17 1/2 л. Тираж 20 000. Зак. № 616.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ.

Предлагаемая книга имеет в виду служить пособием для учащихся средних технических учебных заведений. Она может быть использована также для самообразования и при подготовке в ВУЗы, так как содержит изложение всех тех вопросов, которые обычно включаются в программу элементарной физики.

Вся книга разбита на две части. В первую часть входит — введение, механика, учение о жидкостях, газах и твердых телах, теплота. Во вторую часть войдут следующие отделы: природные источники энергии, электричество, акустика и оптика.

При составлении первой части автор пользовался материалом из первого тома книги П. А. Рымкевич и М. М. Зиборова «Техническая физика», причем были использованы лишь те главы, которые составлены П. А. Рымкевичем. Весь этот материал был тщательно переработан, так как указанная выше книга имела ряд существенных недочетов. Вторая часть, ныне готовящаяся к печати, составляется совершенно заново и ничего общего со вторым томом «Технической физики», написанным почти исключительно М. М. Зиборовым, не имеет.

Автор придает весьма важное значение решению задач по физике, ибо на задачах учатся применять на практике полученные знания и относиться сознательно к проработанному материалу. В книге много численных примеров и задач для самостоятельного решения преимущественно технического характера. Некоторые вопросы почти исключительно разработаны на целом ряде технических примеров.

На самостоятельное решение помещенных в книге задач обращается особое внимание читателей, которые будут по ней готовиться для поступления в ВУЗы.

Автор с благодарностью примет все указания на недостатки книги. Направлять письма можно по адресу: Ленинград, Международный пр., 9, Физическая лаборатория Института инженеров путей сообщения.

П. Рымкевич.

Январь 1930 года.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ.

Первое издание книги разошлось в течение месяца. Второе издание, в виду необходимости срочного выпуска книги, печатается почти без перемен.

Число задач для самостоятельного решения учащихся увеличено с 207 до 300.

П. А. Рымкевич.

Июль. 1930.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ.

В третьем издании введена дополнительная статья о технической системе мер, об импульсе силы и количестве движения, значительно развит вопрос о теплопроводности и добавлен ряд примеров и задач. Кроме того после каждого отдела помещены вопросы и задачи для повторения.

Автор убедительно просит как учащихся, так и учащихся указывать на неудачные места книги и сообщать о всех желательных изменениях и добавлениях.

П. А. Рымкевич.

Декабрь. 1930.

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ФИЗИКА И ТЕХНИКА.

§ 1. Значение физики и ее связь с техникой. Среди различных наук о природе одной из наиболее важных и основных следует считать физику.

Древние считали «физикой» совокупность всех естественных наук; в настоящее же время под физикой мы разумеем вполне определенную область знания, изучающую явления, т. е. изменения, происходящие с телами природы в тех случаях, когда внутренний состав этих тел не меняется. Физика дает общие законы, которыми пользуются и другие науки о природе.

Применение для практических целей физических законов является делом техники. Техника — это, главным образом, прикладная физика, и многим успехам ее мы обязаны работе физиков.

Технические науки выросли из соответствующих отделов физики.

Так, вся электротехника — не что иное, как практическое применение части физики — учения об электрических и магнитных явлениях.

Строительная механика — наука о расчете различного рода инженерных сооружений: мостов, путепроводов, стропил, туннелей, шлюзов, плотин и проч. — является лишь применением на практике части физики, называемой механикой.

Расчеты, необходимые при работах по водоснабжению, канализации, осушению, орошению, при шлюзовании рек и т. д., опираются на формулы гидравлики — науки, рассматривающей обстоятельства движения жидкостей и действия их ударом и сопротивлением. А гидравлика опять-таки лишь развитие части физики.

Современные гигантские воздушные корабли обязаны своим существованием изучению свойств воздушного океана, что также тесно связано с физикой.

Паровая механика, при помощи которой рассчитываются всевозможные паровые машины, опирается на учение о теплоте, которое является также одним из отделов все той же физики.

Мы ограничимся этим перечнем технических наук, занятых практическим применением к жизни физических законов, которого вполне достаточно, чтобы указать на тесную связь физики и техники.

Тот, кто намечает себе техническую деятельность, должен пред-варительно старательно изучать физику, так как недостаточно одной практики без основ теории...

Но ознакомиться с физикой следует не только из утилитарных соображений. *Физика удовлетворяет свойственное каждому человеку стремление понять окружающие его явления природы, которые при свете науки принимают для знающего человека совсем иную окраску.*

Физика дает ответ на многие вопросы, возникающие у каждого человека. Она объясняет многообразные явления природы (образованные восток, туманов, дождя, появление росы, происхождение эхо и т. д.), знакомит нас с идеей устройства и принципом действия многих технических приспособлений, аппаратов и машин, с которыми нам приходится встречаться на каждом шагу нашей обыденной жизни (электрическое освещение, электрический звонок, телеграф, телефон, паровоз, аэроплан и т. д.).

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ВЕЩЕСТВО, ЯВЛЕНИЕ.

§ 2. Понятие о физическом теле и веществе. Зрение, слух, осязание, обоняние и вкус носят название внешних чувств человека, так как при помощи их он познает окружающий его внешний мир. Эти чувства знакомят человека с различными предметами (как-то: животными, растениями, камнями, всевозможными сооружениями и проч.), которые носят общее название *физических тел*.

§ 3. Явления. Всякие изменения, происходящие с физическими телами, носят название *явлений*.

Начните ходить по комнате, при этом будет изменяться ваше положение относительно предметов, в ней находящихся. Произойдет явление, называемое *движением*.

Зажгите лучинку, с нею также станет происходить изменение: вещество дерева исчезает, вместо него появляются углекислый газ, зола и другие продукты сгорания. Это явление *горения*.

По проволоке идет электрический ток, звонит колокол, вращается громадное маховое колесо машины, человек вдыхает и выдыхает воздух — все это различные явления.

Некоторые из упомянутых нами явлений весьма существенно отличаются друг от друга. Таковы, например, движение и горение.

В первом — вещество тела не претерпевает изменения, во втором же с веществом происходит коренная перемена: вместо дерева, из которого состояла лучина, мы получили новые вещества, совершенно иной природы. Явления, при которых вещества тел не меняются коренным образом, носят название *физических* и рассматриваются в *физике*.

Явления второго типа, сопровождающиеся изменением природы вещества, называются *химическими*. Их изучением занимается *химия*.¹

¹ Следует, однако, отметить, что резкой границы между физикой и химией провести нельзя. Обе эти науки весьма близко соприкасаются друг с другом.

При прохождении электрического тока по металлической проволоке ее вещество осталось без изменения, произошло только нагревание проволоки, т. е. явление физическое.

Процесс, происходящий при дыхании, мы должны, наоборот, отнести к химическим явлениям. Человек вдыхает воздух, в состав которого входит кислород, при выдыхании же взамен части кислорода выделяется совершенно новое вещество — углекислый газ.

Ветер вращает колеса мукомольной мельницы; кусок железа, находящийся во влажном месте, покрывается ржавчиной; магнит притягивает кусок стали; при выстреле из орудия происходит взрыв пороха. Попробуйте сами решить, какие из указанных нами явлений должны быть отнесены к физическим, а какие к химическим.

§ 4. Физические величины. *Те качества физических тел и различного рода явлений, которые могут быть больше или меньше, носят название физических величин.*

Длина является одним из примеров физических величин, так как она может быть больше или меньше. Длина стола в вашей комнате 1 м, а длина карандаша 15 см. Расстояние от Земли до Солнца в среднем 149 000 000 км, а расстояние от Ленинграда до Москвы всего лишь около 600 км.

Время — также физическая величина, так как различные события могут иметь большую или меньшую длительность. Земля совершает оборот вокруг Солнца в $365\frac{1}{4}$ дней, а вокруг своей оси она поворачивается в 24 часа; на переезд из Ленинграда в Москву в скором поезде тратится 10—12 часов, тот же переезд на аэроплане может быть совершен в $3\frac{1}{2}$ —4 часа.

Вес тела также является физической величиной, ибо он может быть больше или меньше. Так, вес гайки меньше веса тяжелого молота, а громадный токарный станок имеет еще больший вес.

Приведем еще несколько примеров физических величин. Назовем хотя бы: площадь, объем, скорость движения. В дальнейшем нам придется познакомиться с целым рядом физических величин.

§ 5. Измерение величин. Так как в физике нам приходится постоянно иметь дело не только с качественной стороной изучаемых явлений, но и с количественной, то необходимо ознакомиться с измерением величин.

Измерить какую-нибудь физическую величину — это значит сравнить ее с другою однородною ей величиной, условно принятой за единицу.

Если мы желаем измерить длину стола, мы должны выбрать некоторую единицу длины, например метр, и установить, сколько раз в длине стола укладывается длина нашей единицы — метра или части его.

Поводом для выбора той или иной меры за единицу измерения служили самые различные, часто случайные, обстоятельства. Ученые, однако, стремились с давних пор установить систему наиболее рациональных мер.

В конце XVIII столетия в Париже была установлена *метрическая система* единиц, которая в настоящее время введена и у нас

в Союзе. В науке всех стран пользуются также исключительно метрическими мерами.

§ 6. Точность производства измерений. Вследствие несовершенства наших органов чувств и тех инструментов, коими мы пользуемся при различного рода измерениях, эти последние никогда не бывают *абсолютно точны*.

Произведя несколько раз какое-либо измерение, мы обычно получаем различные результаты. Положим, при трехкратном измерении длины некоторого тела мы получили следующие данные:

$$40,52 \text{ см.}, 40,42 \text{ см.}, 40,53 \text{ см.}$$

Найдем среднюю длину, которую и примем за истинную:

$$\frac{40,52 + 40,42 + 40,53}{3} = 40,49 \text{ см.}$$

Определим теперь те ошибки, которые мы имели бы, пользуясь вместо средней длины данными, полученными при отдельных измерениях:

$$\begin{array}{lcl} 40,52 - 40,49 = 0,03 & \dots & \text{(ошибка при первом измерении),} \\ 40,42 - 40,49 = -0,07 & \dots & \left. \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right\} \text{второй} \\ 40,53 - 40,49 = 0,04 & \dots & \left. \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right\} \text{третьем} \end{array}$$

Не обращая внимания на знаки ошибок, которые для нас не имеют значения, определим среднюю ошибку:

$$\frac{0,03 + 0,07 + 0,04}{3} \approx 0,05 \text{ см.}$$

Итак, при нашем измерении мы допустили среднюю ошибку в 0,05 см.

Эта ошибка носит название *абсолютной*.

Однако, знание абсолютной ошибки обычно не дает достаточно ясного представления о *точности измерения*.

Положим, вам оказали, что при взвешивании муки была допущена ошибка в 1 кг. Много это или мало?

Если вы покупали всего 5 кг муки и вам не додали 1 кг, ошибка очень велика, если же при приемке целого вагона муки была ошибка в 1 кг, она чрезвычайно мала и никакого практического значения не имеет.

Итак, важно знать *относительную погрешность*, т. е. какую долю от измеряемой величины представляет абсолютная ошибка.

Ошибка в 1 кг при покупке 5 кг муки дает относительную погрешность $= \frac{1}{5}$, или 20%.

Та же абсолютная ошибка в 1 кг при приемке муки в количестве 10 000 кг дает относительную погрешность $= \frac{1}{10000}$ или 0,01%.

При производстве различного рода измерений следует, конечно, иметь в виду, для *какой цели* это измерение производится, соответственно чему и выбирать необходимую точность.

Странно было бы измерять расстояние от Земли до Солнца с точностью до миллиметра или, наоборот, при изготовлении образцового метра для Палаты мер и весов ограничиться точностью в 5 см, т. е. допустить относительную ошибку в $\frac{5}{100} = 5\%$.

§ 7. Приближенные вычисления. Производя различные действия с приближенными величинами, необходимо знать, какой точностью вычислений следует ограничиться?

Предположим, известно, что на площадь в 3 см² давит груз в 50 кг. Требуется определить давление, приходящееся на единицу площади. Деля 50 кг на 3

мы получаем 16,666... Спрашивается, на каком десятичном знаке следует остановиться.

Пусть при измерении величины груза могла быть допущена ошибка в 1 кг; на каждом квадратном сантиметре нашей площади она отразится в количестве $\frac{1}{100}$ кг. Так как возможная ошибка в полученном числе 16,666 равна $\frac{1}{10}$ кг, т. е. *отрицается уже в десятых долях*, то, конечно, не следует выписывать множество десятичных знаков, а достаточно ограничиться приближенным значением в 16,7 кг/см².

В математике даются вполне определенные правила округления с приближенными величинами, коих следует строго придерживаться, помня, что в технике очень часто бывает достаточно ограничиться весьма приближенными результатами, не гонясь за излишней точностью.

§ 8. Изучение явлений. Опыт и наблюдение. Представьте себе, что вы, заинтересовавшись некоторым явлением природы, пожелали его обстоятельно изучить. В чем должна выразиться ваша работа и когда вы сможете заявить, что явление вами действительно изучено?

Прежде всего вам придется выяснить, с какими другими явлениями и факторами связано изучаемое вами явление, а затем установить, какова эта связь.

Если в результате такого исследования вы сможете прийти к некоторому определенному выводу, выражающему постоянное и неизменное соотношение между данным явлением и другими явлениями и факторами, его обуславливающими, то вами будет получен закон.

Положим, вас заинтересовал вопрос об изменении длины тел в зависимости от их температуры, т. е. степени нагрева. Каким путем можно его исследовать? Возможны два различных способа. Во-первых, *метод наблюдений*, т. е. изучение явлений в естественной, обычной для них обстановке, и, во-вторых, *метод производства опытов*, т. е. создание в лаборатории особых искусственных условий, при которых производится исследовательская работа.

Воспользуемся сначала первым из указанных методов. Подойдем к полотну железной дороги и сколь возможно точно измерим величину целого ряда зазоров между рельсами при той температуре, которая имеет место в данный момент. Будем затем систематически производить подобные измерения при различных температурах, для чего нам придется совершить целый ряд путешествий, может быть, в течение нескольких месяцев. Изменение величины зазоров даст нам возможность вычислить укорочение или удлинение самих рельсов. Результаты всех наблюдений будем тщательно отмечать.

Примем длину рельса при 0° за основную и, подсчитав, на сколько она увеличилась или уменьшилась при изменении температуры, составим таблицу:

Температура	Изменение длины рельса
30°	удлинение на 6,0 мм
20°	» » 4,0 »
8°	» » 1,6 »
5°	» » 1,0 »
— 4°	укорочение » 0,8 »
— 10°	» » 2,0 »
— 15°	» » 3,0 »

Из написанного ряда цифр следует, что *приращение длины прямо пропорционально изменению температуры*.

Так, при нагревании на 8° — удлинение равно 1,6 мм, а при нагревании на 20° , т. е. в $2\frac{1}{2}$ раза большее, и удлинение составляет величину в $2\frac{1}{2}$ раза большую, чем в первом случае, и равно 4 мм и т. д.

Придя к такому заключению с помощью данных, полученных нами при наблюдении над железным рельсом, мы должны, прежде чем принять, как общее правило, установленную нами связь между приращением длины и изменением температуры, произвести ряд подобных наблюдений над различными другими телами, иной формы и размеров и сделанными из разнообразных материалов.

Если во всех случаях мы получим ту же зависимость, только тогда мы сможем принять установленное нами соотношение как некоторый постоянный закон.

Но, может быть, выведенный нами закон справедлив лишь только тогда, когда температура нагревания или охлаждения сравнительно немного отличается от 0° , а если бы мы сильнее нагрели наш рельс или иное испытуемое тело (например, на 200° — 300°), или значительно охладили его, то закон удлинения был бы иной?

Чтобы выяснить наше сомнение, необходимо измерить длину рельса при сравнительно высокой и низкой температуре; но на поверхности Земли в естественной обстановке мы обычно таких температур не наблюдаем и можем получить их лишь искусственно, нагревая или охлаждая испытуемое тело.

Итак, чтобы выяснить пределы применения закона, выведенного на основании наблюдений, нам все же необходимо произвести опыты.

Значительно проще было бы вместо длинной процедуры наблюдений сразу же произвести опыты. Взять ряд различной длины стержней, сделанных из разных материалов, нагревать их до определенной температуры и измерять соответствующую длину.

Нам не понадобится бы тратить целый год на наши наблюдения, выжидая, когда температура летом достаточно поднимется, а зимой, наоборот, понизится; мы смогли бы все наши измерения проделать в течение нескольких часов. Пределы колебания температуры воздуха в естественной обстановке на поверхности Земли невелики, тогда как в лаборатории мы можем по желанию нагреть изучаемые нами образцы как угодно высоко или, наоборот, охладить сколь требуется низко.

Те измерения, которые мы будем производить в лаборатории, нам легче выполнить точно, так как у нас под рукой будут все необходимые для этой цели приборы.

Таким образом, производство опытов значительно облегчает нам работу по изучению многих явлений природы.

Однако, никогда не следует пренебрегать и наблюдениями, пользуясь также и ими при всех удобных случаях.

§ 9. Процесс установления законов. Рассмотрим еще пример, на котором покажем процесс установления законов. Займемся хотя бы вопросом об удлинении тел при растяжении.

Пусть мы имеем дело со стержнем цилиндрической формы, один конец которого неподвижно закреплен, а другой растягивается. На

основании ряда наблюдений и опытов мы приходим к заключению, что удлинение стержня зависит от величины растягивающего груза, длины стержня, площади его поперечного сечения, а также и материала, из которого он сделан.

Прежде всего установим связь между величиной удлинения и растягивающим грузом. Для этого проведем ряд опытов, при которых будем менять величину груза, оставляя без изменения все остальные факторы, влияющие на удлинение, как-то: длину, площадь сечения и материал, из которого сделан стержень.

Подвесим к концу стержня груз в P кг и измерим то удлинение a , которое при этом получится: заменим груз P другим грузом в два раза большим, т. е. $2P$, и измерим величину приращения длины, которая окажется равной $2a$, затем поместим груз $3P$, $4P$ и т. д.

Полученные данные записываем в виде таблицы:

Растягивающий груз	Величина удлинения
P кг	a см
$2P$ »	$2a$ »
$3P$ »	$3a$ »
$4P$ »	$4a$ »
$5P$ »	$5a$ »
.....	
$20P$ »	$20a$ »

Мы видим: во сколько раз больше растягивающий груз, во столько же раз больше и удлинение, т. е. *удлинение прямо пропорционально величине растягивающего груза*.

Проверив полученный вывод на целом ряде других опытов и придя к такому же результату, перейдем к установлению связи между удлинением и первоначальной длиной стержня. Станем брать стержни различной длины и измерять соответствующие удлинения, оставляя неизменными величину растягивающего груза, площадь сечения и материал, из которого сделаны испытываемые стержни.

Данные также представим в виде таблицы:

Длина стержня	Величина удлинения
l см	b см
$2l$ »	$2b$ »
$3l$ »	$3b$ »
$4l$ »	$4b$ »
.....	
$10l$ »	$10b$ »

Проверив полученный вывод целой серией подобных опытов, мы так же, как и в предыдущем случае, установим некоторое положение: *удлинение прямо пропорционально первоначальной длине растягиваемого стержня*.

Займемся теперь установлением связи между удлинением и площадью поперечного сечения стержня. Будем брать стержни различной

площади сечения, но одинаковой длины и растягиваемые постоянным грузом, и станем измерять соответствующие удлинения:

Площадь поперечного сечения	величина удлинения
$F \text{ см}^2$	$\frac{c}{1}$ см
$2F$ >	$\frac{c}{2}$ >
$3F$ >	$\frac{c}{3}$ >
$4F$ >	$\frac{c}{4}$ >
.....	
$10F$ >	$\frac{c}{10}$ >

Из таблицы видно, что во сколько раз больше площадь поперечного сечения, во столько же раз меньше удлинение, или, иначе говоря, *величина удлинения обратно пропорциональна площади поперечного сечения растягиваемого стержня.*

Так же, как и в предыдущих случаях, прежде чем окончательно установить это положение, проверим его на целом ряде опытов и, лишь получив во всех случаях одинаковый результат, будем считать сделанный нами вывод правильным.

Запишем результат всех наших опытов в математическом виде, т. е. составим формулу

$$n = K \frac{L \cdot P}{F},$$

которая показывает, что *удлинение (n) прямо пропорционально первоначальной длине стержня (L) и растягивающей силе (вес груза) (P) и обратно пропорционально площади поперечного сечения (F).*

Действительно, L и P у нас стоят в числителе дроби; чем они больше, тем больше и вся дробь, выражающая удлинение n ; наоборот, F стоит в знаменателе, а мы знаем, что во сколько раз знаменатель дроби увеличивается, во столько раз сама дробь уменьшается.

Таким образом, величины, стоящие в числителе дроби, показывают прямо пропорциональную, а состоящие в знаменателе — обратно пропорциональную зависимость.

§ 10. Коэффициент пропорциональности. В формуле стоит еще число K , называемое *коэффициентом пропорциональности*, которое заменяет собой слово «пропорционально» и в данном случае показывает, что стержни из различных веществ различно удлиняются при растяжении.

Если мы возьмем стержень длиной в 1 см, площадью поперечного сечения в 1 см² и станем растягивать силой (грузом) в 1 кг, то величина соответствующего удлинения получится по формуле: $n = K \frac{1 \cdot 1}{1}$

или $\pi = K$, т. е. коэффициент пропорциональности показывает то удлинение, которое получает стержень, длиною в 1 см, площадью поперечного сечения в 1 см², при растяжении силой в 1 кг.¹

Для различных веществ K различно; так, оно сравнительно очень мало для стали и железа, несколько больше для меди, еще больше для свинца и т. д.

Вычислив значения K для различных веществ и установив пределы, в которых выведенное нами соотношение справедливо (при очень больших растягивающих силах найденная нами закономерность уже не имеет места), мы можем считать, что наша задача составления закона выполнена.

Возвратимся теперь опять к вопросу об удлинении тел при нагревании. На основании многочисленных опытов мы заключаем, что удлинение тела (l) прямо пропорционально изменению температуры (t) и его первоначальной длине при 0° (L), т. е.:

$$l = KLt,$$

где K — коэффициент пропорциональности. Подставляя вместо L — единицу длины и вместо t — один градус, получим:

$$l = K \cdot 1 \cdot 1, \quad K = l,$$

т. е. коэффициент пропорциональности показывает удлинение единицы длины тела при нагревании на 1°. Он носит название коэффициента линейного расширения.

Для железа он равен 0,000012
 » меди » » 0,000017
 » цинка » » 0,000029 и т. д.

§ 11. Графический метод в физике. Вы, конечно, знаете, что у здорового человека температура тела колеблется в незначительных пределах от 36,6° до 37°. Если человек заболевает, то температура тела обычно повышается и доходит иногда даже до 40° — 41°, при упадке же сил после тяжелых болезней, наоборот, замечается понижение температуры.

Характер изменения температуры тела больного имеет для врача чрезвычайно важное значение, — вот почему ее измеряют у больных несколько раз в день.

Вот результат записи температур тела троих больных.

¹ Конечно, величина коэффициента пропорциональности зависит от выбора единиц. Если мы, например, у нас пользоваться не метрическими мерами, а старыми русскими и возьмем за единицу длины стержня 1 фут, за единицу площади сечения — 1 кв. дюйм, за единицу силы — 1 пуд, то соответствующая величина удлинения (коэффициент пропорциональности) будет иной.

Число и месяц	Часы	Температура тела		
		1-го больн.	2-го больн.	3-го больн.
1 августа	6 > утра	37,8	39,5	37,6
	12 > дня	38,6	39,8	38,0
	6 > дня	40,8	40,0	38,2
	12 > ночи	41,0	40,2	38,4
2 августа	6 ч. утра	37,4	39,4	39,0
	12 > дня	38,6	39,6	39,2
	6 > дня	40,6	39,9	39,4
	12 > ночи	40,8	39,9	39,4
3 августа	6 > утра	38,4	38,2	39,6
	12 > дня	38,6	38,6	39,8
	6 > дня	39,9	38,8	39,8
	12 > ночи	40,3	39,0	39,8

Врач, посмотрев на эти данные и принимая во внимание другие симптомы, имеет возможность определить характер болезни и наметить план дальнейшего лечения.

Однако, рассматривая табличку с записью показаний термометра, врач должен очень тщательно разобраться в ней, чтобы определить не-

которую закономерность в изменении температур тела больных.

Мы можем значительно облегчить эту работу.

Возьмем лист клетчатой бумаги, проведем две взаимно перпендикулярные прямые — горизонтальную AB и вертикальную CD , которые назовем *координатными осями*. Одну из них, AB , назовем *осью икс* (X), а другую — *осью игреков* (Y), в точке их пересечения поставим букву O и назовем ее *началом координат* (рис. 1).

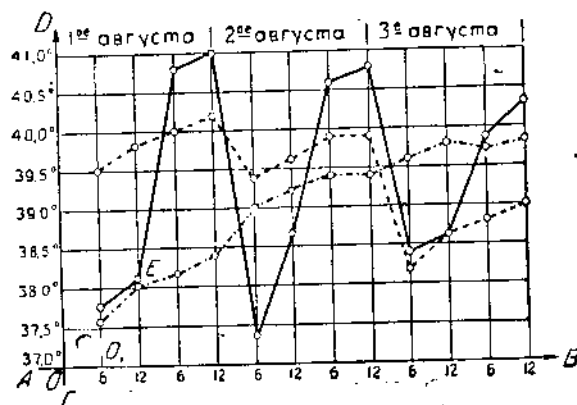


Рис. 1.

На оси x будем откладывать время, а на оси y — соответствующие температуры, причем заранее сами выберем произвольные, но удобные для нас масштабы. Примем хотя бы сторону каждой клетки в горизонтальном направлении за 6 часов, а в вертикальном направлении за $0,5^\circ$. Так как с показаниями термометра ниже 37° нам в данном случае не приходится иметь дело, то мы и начнем отсчитывать температуры от 37° .

На оси x будем откладывать время, а на оси y — соответствующие температуры, причем заранее сами выберем произвольные, но удобные для нас масштабы. Примем хотя бы сторону каждой клетки в горизонтальном направлении за 6 часов, а в вертикальном направлении за $0,5^\circ$. Так как с показаниями термометра ниже 37° нам в данном случае не приходится иметь дело, то мы и начнем отсчитывать температуры от 37° .

Что касается показаний времени, то точку O_1 примем за начало записи, т. е. за 6 час. утра 1 августа.

У первого больного в 6 час. утра 1 августа было $37,8^\circ$. Из точки O_1 , параллельно линии CD , отложим вверх расстояние, соответствующее $37,8^\circ$, и отметим полученную точку. Отложив в горизонтальном направлении 1 клетку, получим точку, соответствующую времени 12 час. дня 1 августа, отсчитаем вверх расстояние, отмечающее температуру в этот момент, получим вторую точку E , и т. д. Все полученные точки мы соединим между собой отрезками прямых и получим *график*, наглядно показывающий характер изменения температуры тела первого больного.

Подобным образом, мы поступим и с данными, касающимися второго и третьего больного, но для отличия графики, относящиеся к ним, прочертим особыми пунктирными линиями.

Теперь посмотрите на полученные графики. Не правда ли, как наглядно виден характер изменения температуры у каждого из трех больных?

Вам, вероятно, известно, что во всех культурных странах существуют особые метеорологические станции, на которых специалисты метеорологи систематически производят наблюдения над состоянием погоды. Каждые сутки в определенное время они измеряют температуру воздуха, направление и скорость ветра и проч.

Совокупность многих наблюдений дает возможность делать ученым в некоторых случаях весьма ценные выводы. Они стараются подметить закономерную связь между определенными явлениями, которая и дает возможность в дальнейшем предугадывать некоторые события.

Было бы чрезвычайно трудно разобраться во множестве систематических записей различных данных; чтобы облегчить себе эту трудную задачу, метеорологи также вычерчивают графики изменения температуры в течение года, изменения скорости ветра и т. д., которые и дают возможность установить интересные закономерности.

Графики получили чрезвычайное распространение во всевозможных отраслях знания и в обыденной жизни.

Вот перед вами график, который показывает изменение числа проданных в Америке за 1907—1919 годы электрических лампочек с угольной и металлической нитью. Вы видите, как постепенно уменьшается потребление угольных лампочек и возрастает спрос на более экономические лампочки с металлической нитью (рис. 2).

Ученики одного из учебных заведений завели у себя обычай вычерчивать в течение года отдельно для каждого класса график посе-

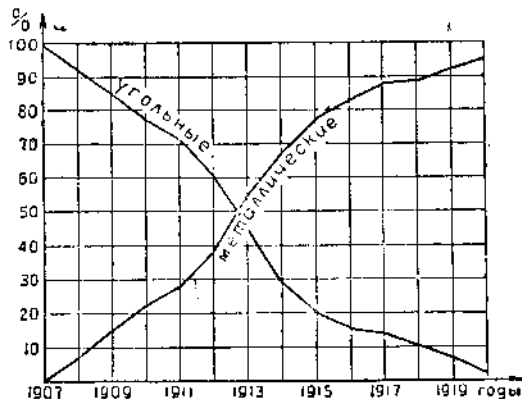


Рис. 2.

щаемости учащимися уроков. Вот перед вами часть такого графика (рис. 3).

Масштаб выбран такой: длина одной клетки в горизонтальном направлении соответствует одному учебному дню, а в вертикальном на-

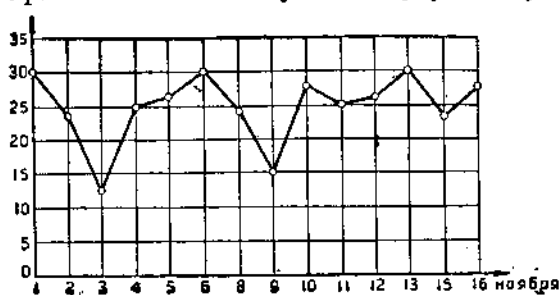


Рис. 3.

правлении — пяти ученикам. Не правда ли, график говорит яснее, чем любая таблица с цифрами?

Многие лица, которым постоянно приходится обращаться с цифрами и графиками, так привыкают к этим последним, что стараются представить себе почти все явления окружающей жизни в виде графиков. Говоря о повы-

шении цен, они мысленно рисуют себе график, в котором проведены линии, отмечающие изменение цен на важнейшие продукты, и т. д.

В физике графический метод имеет широкое применение. Связь между двумя явлениями, выраженная в форме графика, иногда в значительной мере облегчает быстрое установление закона.

Положим, мы выясняем связь между изменением температуры и удлинением тела и получаем следующие данные:

Изменение температуры	Удлинение тела
+ 5°	2 мм
+ 10°	4 >
+ 18°	7,2 >
+ 20°	8 >
+ 25°	10 >

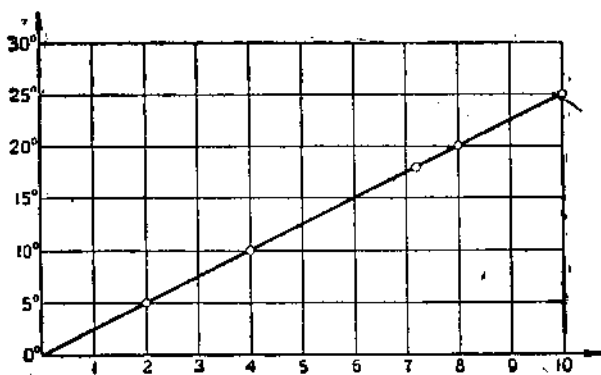


Рис. 4.

Если мы вычертим график зависимости

между указанными двумя величинами, то заметим (рис. 4), что все точки лежат на одной прямой, что выражает прямо пропорциональное соотношение между изменением температуры и удлинением тела.

§ 12. Гипотеза. Очень часто опыты и наблюдения, давая нам возможность изучить то или иное явление природы и притти, наконец, к установлению закона, не указывают, однако, на причину этого явления.

Так, например, хотя мы на основании долгой исследовательской работы и пришли к выводу закона об удлинении тел при нагревании, но никаких данных о причине этого явления мы не получили.

Почему же тела расширяются при нагревании? — задает вопрос природная любознательность человека.

В ответ на него мы можем только высказать то или иное предположение. Такое научно-обоснованное предположение носит название гипотезы.

§ 13. Гипотеза о строении вещества. Чтобы ответить на вопрос о причине расширения тел при нагревании, мы должны будем углубиться в область строения вещества.

Изучая строение физических тел, мы можем высказать два предположения. Первое: каждое тело сплошь заполнено некоторой материей, или второе: каждое тело построено из отдельных частиц, разделенных пустотами. О частицах также можно высказать две гипотезы: либо они неподвижны, либо они находятся в постоянном движении.

Исходя из предположения о сплошном строении вещества, мы не сможем объяснить причину расширения тел при нагревании, тогда как вторая наша гипотеза — о строении вещества из отдельных частиц, разделенных промежутками и находящихся в движении, легко сможет нам дать надлежащее разъяснение. Пока тело в холодном состоянии, его частицы движутся сравнительно медленно. При нагревании же тела частицы начинают двигаться быстрее, в результате чего им нужно и больше места для своего движения, они как бы расталкивают друг друга, и объем тела возрастает; число частиц при этом, конечно, не увеличивается, а, следовательно, вес тела остается неизменным (взвешивая одно и то же тело при различных температурах, мы легко убедимся, что вес тела при нагревании не меняется), объем же увеличивается за счет возрастания промежутков между частицами.

Приложим к какому-нибудь нагретому телу другое холодное. При этом начнет происходить передача тепла от первого тела ко второму до тех пор, пока температуры их не сравняются. Что же происходит при этом?

Частицы нагретого тела движутся сравнительно быстро, они задевают медленно движущиеся частицы холодного тела и передают им часть своей скорости, приводя их в более быстрое движение. В результате — холодное тело начинает нагреваться (частицы приходят в более быстрое движение), а горячее тело остывает (частицы его замедляют свое движение) до тех пор, пока температура обоих тел не сравняется.

Возьмем два одинаковых цилиндрических сосуда и напомним один из них водородом, а другой углекислым газом. Сосуд, заключающий в себе легчайший газ — водород, поставим своим отверстием на отверстие нижнего, в котором находится более тяжелый углекислый газ (рис. 5). Если бы каждый из этих газов представлял собою некоторую сплошную массу, то не было бы причины им смешиваться, тем более, что легкий газ находится в верхнем цилиндре, а более тяжелый — в нижнем. Однако, опыт показывает, что газы быстро переме-

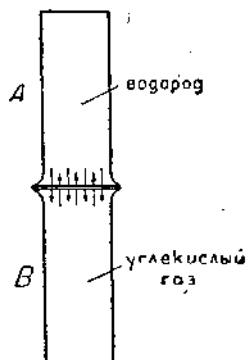


Рис. 5.

шиваются, так как частицы каждого из них при своем движении заходят в пространство между частицами другого газа. Если бы мы отделили газы друг от друга пористой перегородкой, то явление взаимного проникания частиц из одного цилиндра в другой также имело бы место. Кстати отметим, что свойство газов самопроизвольно смешиваться физики называют *диффузией*.

Как показывает опыт, жидкости также обладают этим свойством, т. е. легко смешиваются и при непосредственном соприкосновении, и через пористую перегородку.

Твердые тела при известных условиях также способны смешиваться между собой. Так, например, был произведен такой опыт: на золотой листочек был наложен свинцовый цилиндр и оставлен в этом положении при комнатной температуре в течение 4 лет; оказалось, что частицы золота проникли в слой свинца на глубину в 5 мм.

Бельгийский ученый Спринг производил такой опыт: он брал пластинки меди и цинка, нагревал их до температуры около 100° , чтобы увеличить скорость движения частиц, и плотно прижимал друг к другу.

Исследовав затем соприкасавшиеся поверхности, он находил на поверхности меди частицы цинка, а на поверхности цинка частицы меди; следовательно, при своем движении частицы меди зашли в пространство, занимаемое частицами цинка, и наоборот. Чтобы доказать, что частицы одного тела попали на поверхность другого именно вследствие своего теплового движения, а не случайно, Спринг отделял друг от друга соприкасавшиеся поверхности меди и цинка прослойкой слюды; в этом случае результат получался такой же: частицы меди проходили при своем тепловом движении сквозь слой слюды и могли быть обнаружены на поверхности цинка, и наоборот.

Частицы, из которых построены тела, носят название *молекул*.

§ 14. Температура тел. Мы уже говорили, что от быстроты движения молекул зависит температура тел. Для ее измерения служит прибор, называемый *термометром* (в обыденной жизни его часто именуют *градусником*). Он состоит из тонкой, запаянной сверху стеклянной трубки с резервуаром в форме шарика или цилиндра на конце. Этот шарик и часть трубки наполнены какой-нибудь жидкостью, чаще всего ртутью или подкрашенным спиртом. Из пространства трубки над жидкостью воздух удален.

Для нанесения делений на шкалу, которой снабжается трубка, термометр помещают в тающий лед и там, где останавливается ртуть, ставят 0° . Затем помещают термометр в пары кипящей воды (при определенном состоянии атмосферы, принятом за нормальное) и ставят 100° . Пространство от 0° до 100° делят на 100 равных частей и каждое деление называют *градусом*. Такой термометр получил название термометра *Цельсия* — он применяется в науке и во всех странах, где пользуются метрическими мерами. Оглядывая такие же деления ниже 0° , получают отрицательную температуру (в обыденной жизни ее называют температурой холода).

§ 15. Удельный вес и его определение. Если бы мы сделали из разных веществ ряд кубиков одинакового объема, например, по 1 см^3 ,

и определяли их вес, мы получили бы различные результаты, так как тела отличаются друг от друга весом своих молекул и расстоянием между ними. Чем больше вес каждой молекулы и чем меньше между ними расстояние, тем больше будет вес кубика.

Удельным весом тела называется вес одного кубического сантиметра его, выраженный в граммах.

На удельный вес, конечно, влияет температура. С повышением температуры возрастают промежутки между молекулами и удельный вес становится меньше. Вот почему всегда, когда указывается удельный вес тела, отмечается и температура, при которой он приводится.

Ниже помещены удельные веса некоторых твердых и жидких тел

Твердые тела.

Вещество	Удельный вес при 0°	Вещество	Удельный вес при 0°
Антрацит	1,5	Сосна сухая	0,48
Бетон	2,25	» свежеср. бл.	0,74
Глина свежесыр.	2,25	Пр. бка	0,24
» сухая	1,4	Лед	0,9
Гранит	2,65	Стекло (кромглас)	2,56
Земля сух. прессов.	1,8	Алюминий	2,6
» » рыхлая	1,2	Золото	19,2
Известняк	2,7	М. дь литая	8,8
Песок сухой	1,5	Олово литое	7,23
Кирпич	1,8	Латуна литая	8,45
Черное дерево	1,2	Сталь х тая	7,86
Дуб сухой	0,80	Железо сварочное	7,8
» свежесрубл.	1,05	Платина	21,5
Ель сухая	0,60	Свинец	11,4
» свежесрубл.	1,00	Серебро	10,5
Береза сухая	0,72	Цинк	7,05
» свежесрубл.	0,90	Чугун	7,0

Жидкости.

Вещество	Удельный вес при 15°	Вещество	Удельный вес при 15°
Водяни	0,69—0,70	Нефть	0,77
Вода чистая (при 4°)	1,00	Ртуть (при 0°)	13,6
Касторовое масло	0,97	Сквипидар	0,86
Е. росин	0,79—0,82	Спирт этиловый	0,79
Масло оливковое	0,92	Эфир	0,72

Как нужно понимать, что удельный вес железа при 0° равен 7,8? Это значит, что каждый кубический сантиметр железа при 0° весит 7,8 грамма.

Кубический дециметр имеет 1000 см³, его вес, следовательно, в 1000 раз больше, чем вес 1 см³. 1000 граммов составляют 1 килограмм. Таким образом 1 дм³ железа весит 7,8 кг.

Кубический метр имеет 1000 дм³ и весит в 1000 раз больше, нежели 1 дм³. 1000 кг составляют 1 тонну. Следовательно, 1 м³ железа весит 7,8 т.

Итак, *удельный вес показывает, сколько граммов весит 1 см³ тела, или сколько килограммов весит 1 дм³ его, или сколько тонн весит 1 м³ его.*

Обозначим вес всего тела — P г, а объем его V см³.

Если V см³ весит P г, то каждый кубический сантиметр весит в V раз меньше, т. е. удельный вес D может быть найден как частное от деления числа P , заключенных в весе всего тела (P), на число см³, заключенных в объеме (V):

$$D = \frac{P}{V}.$$

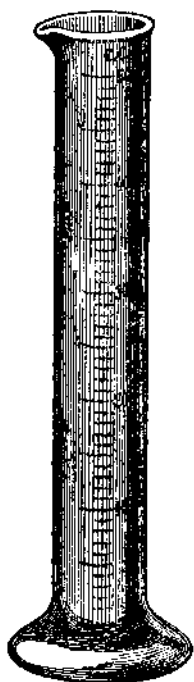


Рис. 6.

Таким образом, для определения удельного веса твердого тела нужно знать его вес и объем.

Для определения объема можно поступить следующим образом: налить в мензурку с делениями (рис. 6) до определенной черты воды, а затем опустить в нее на ниточке тело. Повышение уровня воды позволит найти объем тела.

Пусть, например, до погружения в мензурку тела уровень воды приходится против 200-го деления, т. е. в мензурке было 200 см³ воды. После опускания в воду тела уровень воды поднялся до 280-го деления. Очевидно, тело вытеснило 80 см³ воды, а следовательно его объем был равен 80 см³.

Для этой же цели можно воспользоваться отливной банкой A (рис. 7). Если наполнить ее водою, то горизонт воды остановится на уровне отверстия (n) в изогнутой трубке c . Подставив под конец этой трубки (k) стаканчик B , опускают в банку A испытуемое тело M , оно вытесняет воду, уровень ее по-

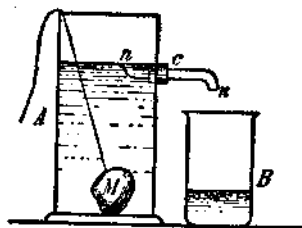


Рис. 7.

вышается и вода вытекает по трубке c в стаканчик B , причем переливается объем воды, равный объему тела M , т. е. горизонт воды в банке A вновь устанавливается на уровне отверстия n .

Стаканчик B взвешивают с водою, а затем вторично взвешивают без воды, разность весов даст чистый вес воды. Так как каждый см³ воды весит 1 г, то по весу вытесненной телом M воды можно определить ее объем, а следовательно и объем тела.

§ 16. Тела однородные и неоднородные. Тела, все молекулы которых совершенно одинаковы, носят название однородных. Такова, например, абсолютно чистая вода.

Будет ли представлять собой раствор какой-нибудь краски в воде однородную жидкость? Конечно, нет. В ней находятся помимо молекул воды еще и молекулы краски.

Неоднородность некоторых тел сразу бросается в глаза, например,

неоднородность гранита, в куске которого находятся три минерала, — кварц, слюда и полевой шпат, построенные из различного рода молекул. Неоднородность других тел может быть установлена только путем исследования; так, например, воздух на первый взгляд кажется веществом однородным, однако, вы найдете в нем множество разнообразных молекул: азота, кислорода, аргона, углекислого газа, водяных паров и т. д.

§ 17. Тела простые и сложные. Окружающих нас даже однородных веществ чрезвычайно много. Неужели молекулы, из которых построены все эти вещества, совершенно различны, или они имеют нечто общее между собою?

Прежде всего разделим все вещества на две основных группы — *простые и сложные*. Первые из них неспособны далее разлагаться на еще более простые составные части, тогда как во вторых может быть обнаружено присутствие нескольких простых веществ.

Железо, медь, свинец, золото, серебро, фосфор, сера, водород, кислород, азот — все эти тела простые; никаким способом нельзя разложить ни одно из этих тел на более простые составные части. Вода же тело сложное. Пропуская электрический ток через подкисленную серной кислотой воду, мы можем разложить ее на составные части и получить вместо воды два газа — водород и кислород. Обратно, соединяясь в известной пропорции вместе, кислород и водород образуют воду.

Простых тел нам известно в настоящее время приблизительно 90, все же остальные тела сложные.

Рассмотрим теперь, как построены молекулы тех и других?

У простых тел каждая молекула представляет собою группу соединенных вместе нескольких одинаковых атомов. Так, молекула кислорода представляет собой группу из двух атомов кислорода, молекула азота также имеет два одинаковых атома азота и т. д.

Молекулы же сложных тел представляют собой группу различных атомов. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молекула серной кислоты содержит в себе два атома водорода, один атом серы и четыре атома кислорода.

Таким образом, нам известно около 90 простых тел, атомы которых представляют собой те кирпичики, из различной комбинации коих и построены молекулы всевозможных веществ.

Для краткости и удобства атомы всех простых тел или, как их называют, *элементов*, обозначаются условно одной или двумя буквами, представляющими собой первые буквы латинского названия этого элемента. Приведем таблицу наиболее известных элементов с их условными обозначениями:

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Водород	H	Калий	K	Иод	I
Гелий	He	Кальций	Ca	Барий	Ba
Углерод	C	Хром	Cr	Таллат	Ta
Азот	N	Марганец	Mn	Вольфрам	W
Кислород	O	Железо	Fe	Осмий	Os
Фтор	F	Кобальт	Co	Иридий	Ir
Натрий	Na	Никель	Ni	Платина	Pt
Магний	Mg	Медь	Cu	Золото	Au
Алюминий	Al	Цинк	Zn	Ртуть	Hg

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Кремний	Si	Мышьяк	As	Свинец	Pb
Фосфор	P	Бром	Br	Висмут	Bi
Сера	S	Серебро	Ag	Радий	Ra
Хлор	Cl	Олово	Sn	Торий	Th
Аргон	A	Сурьма	Sb	Уран	U

Из этих обозначений можно составить формулы молекул, показывающие их состав.

Вот формула воды: H_2O . Она показывает, что каждая молекула воды состоит из двух атомов водорода (H_2) и одного атома кислорода (O).

Взгляните на формулу медного купороса: CuSO_4 . Не трудно отметить, что медный купорос — тело сложное, так как каждая молекула его состоит из атомов различных элементов (один атом меди, один атом серы и четыре атома кислорода).

Азотная кислота — HNO_3 (в каждой молекуле — один атом водорода, один атом азота и три атома кислорода).

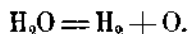
Поваренная соль — NaCl (один атом натрия и один атом хлора).

Размеры молекул и атомов столь малы, что только изумительные достижения современной физики позволили разобраться в них.

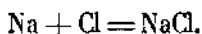
Так, в одном грамме легчайшего вещества — водорода — заключается 606 000 000 000 000 000 000 000¹ атомов. Для наглядности представьте себе, что каждый атом возрос до размеров шарика с радиусом в 1 см. В таком случае атомов, заключенных в 1 грамме водорода, было бы достаточно, чтобы, укладывая их вплотную, составить цепь длиной в 90 миллиардов раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца.

§ 18. Явления физические и химические. Мы уже отметили раньше (стр. 6), что в физике рассматриваются такие явления, при которых не меняется состав вещества тел. Так, например, если мы истолчем кусок мела, то хотя его внешний вид и изменится при этом, но внутренний состав каждой молекулы останется прежний.

Химия, наоборот, изучает такие явления, при которых вещества претерпевают изменения своего состава. Отмеченное нами явление разложения подкисленной воды электрическим током должно быть отнесено к типу химических явлений. Вместо воды мы получаем совершенно иные тела — водород и кислород:



Возьмем кусочек металла натрия и опустим его в сосуд с газом хлором; произойдет соединение атомов хлора с атомами натрия, причем выделится значительное количество тепла и образуется совершенно новое вещество — поваренная соль:



¹ В дальнейшем, чтобы упростить изображение очень больших и очень малых величин, будем обозначать их в виде определенного числа, умноженного на некоторую степень 10. Так, 100 будем обозначать 10^2 , $1000 = 10^3$, $10000 = 10^4$ и т. д. $0,1 = 10^{-1}$, $0,01 = 10^{-2}$, $0,001 = 10^{-3}$ и т. д.

Тогда число атомов водорода в одном грамме будет представлено как $6,06 \cdot 10^{23}$

Это явление также относится к типу химических и рассматривается в химии.

Попутно отметим, что элементы, образуя сложные тела, теряют при этом свои первоначальные свойства. Водород, например, горит в кислороде; образовавшаяся же от химического соединения этих элементов вода не горит.

Также поваренная соль вовсе не похожа по своим свойствам на натрий и хлор, из которых она образовалась.

Вам, конечно, известно, что вода может существовать в природе в трех состояниях — твердом (лед), жидком и газообразном (водяной пар). Так как состав молекулы льда, воды и водяного пара один и тот же: H_2O , то процессы перехода воды из одного состояния в другое представляют собой явления физические и изучаются в физике.

§ 19. Три состояния тел. Огромное большинство простых тел способно, подобно воде, существовать во всех трех характерных состояниях.

Правда, мы привыкли считать железо — телом твердым, ртуть — жидкостью, а кислород и азот, находящиеся в воздухе, — газами, но все эти указанные элементы могут находиться и в других состояниях.

Охарактеризуем каждое из трех состояний вещества и отметим, каким образом возможен переход из одного состояния в другое.

Твердые тела обладают определенным объемом и формой, оказывая противодействие силам, стремящимся их изменить, кроме того, они имеют большое сцепление между молекулами.

Жидкие тела обладают определенным объемом, который и стремятся сохранить; они весьма мало сжимаемы и оказывают значительное сопротивление силам, стремящимся изменить объем, но своей характерной формы жидкости не имеют, принимая форму того сосуда, где они находятся.

Жидкость в стакане имеет форму стакана, перелитая же в бутылку — она принимает форму бутылки и т. д. Сцепление молекул у жидкости значительно меньше, чем у твердых тел.

Газы также не имеют определенной формы, но еще и не сохраняют определенного объема, стремясь постоянно расширяться. Газ, выпущенный в какое-нибудь пространство, обязательно занимает весь предоставленный ему объем. Связь между газовыми молекулами почти совсем отсутствует.

Что нужно сделать, чтобы обратить твердое тело в жидкость?

Необходимо уменьшить сцепление между молекулами, что может быть достигнуто нагреванием, так как при нагревании молекулы начинают двигаться быстрее, расстояние между ними возрастает, а, следовательно, взаимная связь уменьшается.

Чтобы обратить жидкость в газообразное состояние, необходимо еще больше увеличить температуру. При достаточно большой скорости движения молекулы будут отрываться друг от друга, теряя взаимное сцепление; при этом жидкость переходит в газообразное состояние.

Чтобы обратить газ в жидкость, необходимо сблизить молекулы для увеличения взаимной связи между ними, что достигается увеличением давления и понижением температуры (при этом уменьшается скорость их движения и стремление оторваться друг от друга).

Нагревая железу до достаточно высокой температуры, мы можем его расплавить, а затем и обратить в пар.

Наоборот, все известные нам газы могут быть посредством охлаждения и увеличения давления обращены сначала в жидкости, а затем и в твердое состояние. Жидкий воздух, жидкий углекислый газ, жидкий кислород имеют теперь значительные применения в технике.

§ 20. Закон сохранения вещества. Укажем теперь на чрезвычайно важный закон сохранения вещества, предвиденный еще нашим гениальным соотечественником Ломоносовым и окончательно установленный великим французским ученым Лавуазье. Он гласит, что *при всех явлениях как физических, так и химических количество вещества, участвующего в этих явлениях, остается неизменным.*

Что касается физических явлений, то по отношению к ним закон никаких сомнений не вызывает. Вполне очевидно, что количество вещества в куске льда не изменится, если этот лед будет растоплен, расплавлен или даже обращен в пар.

Что касается химических явлений, то они на первый взгляд могут вызвать у нас сомнение. Действительно, мы постоянно видим, как у нас сгорают дрова в печке, т. е. как будто бы их вещество при этом исчезает. Горение же — это одно из химических явлений соединения горящего тела с кислородом воздуха. Однако, если бы мы точно взвесили дрова и кислород воздуха, участвовавший в горении, а затем вторично взвесили углекислый газ, дым, золу, уголь и прочие продукты горения, то второй вес оказался бы точно равным первому.

§ 21. Вопросы и задачи. 1. В ступке истолкли в порошок кусок мела; кусок мела полили серной кислотой, при этом началось выделение углекислого газа; в колбе кипят ртуть; окись ртути при нагревании разлагается на металлическую ртуть и кислород; пресс сжимает сено; сено гниет в поле. Какие из названных явлений нужно отнести к физическим, а какие к химическим?

2. Удельный вес камня $2,6 \text{ г/см}^3$. Найти его вес, если камень имеет форму куба с ребром 20 см.

3. Удельный вес пробки $0,24 \text{ г/см}^3$. Какой объем займет кусок ее весом 300 граммов?

4. Тело весит в воздухе 234 г. При погружении в мензурку оно вытеснило 30 см³ воды. Найти его удельный вес.

5. Лист железа весит 3,9 кг и имеет размеры $120 \times 75 \text{ см}$ (т. е. длину 120 см и ширину 75 см). Найти толщину этого листа.

6. Какой длины железная проволока с диаметром поперечного сечения 4 мм, если вес ее 100 г?

7. Сколько весит мраморная плита размером $80 \times 50 \times 4 \text{ см}$ (т. е. длиной 80 см, шириной 50 см и толщиной 4 см)? Удельный вес мрамора $2,7 \text{ г/см}^3$.

8. Железный молоток весит 4 кг 212 г. Определить его объем.

9. Бутылка имеет форму цилиндра с внутренним диаметром 20 см. Сколько весит налитый в нее на высоту 40 см керосин? Удельный вес керосина $0,82 \text{ г/см}^3$.

10. Определить удельный вес камня, если он имеет размеры $10 \times 7,5 \times 2 \text{ см}$ и весит 375 г.

11. Определить вес кирпича, если его размеры $1,5 \times 3 \times 6$ вершков. Удельный вес кирпича $1,8 \text{ г/см}^3$ (1 вершок = 4,4 см).

12. Золото расплавлено в тонкий листок, квадратный дециметр которого весит 13 м. Найти толщину этого листа.

13. Найти вес 20 м железной проволоки с диаметром сечения 2 мм.

14. На двор размерами $25 \times 40 \text{ м}$ выпал снег толщиной 10 см. Определить, сколько потр. будет для его вывозки, если удельный вес снежного покрова $0,2 \text{ т/м}^2$, а на возу помещается 200 кг снега.

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

МЕХАНИКА.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ДВИЖЕНИЕ И СИЛЫ.

§ 22. Предмет механики. В этом отделе мы будем говорить о движении, силах и их работе, без предварительного знакомства с которыми нам было бы трудно изучать физику.

Не следует думать, что *механика*, которая и занимается указанными выше вопросами, есть наука, существующая только в книгах и совершенно оторванная от жизни. Нет, в ней мы будем изучать те начала, которые постоянно действуют вокруг нас. Она даст нам богатый материал для осознания работы различных механизмов и двигателей, начиная от примитивных рычагов и блоков и кончая грандиозными современными машинами и электродвигателями. Познакомившись с механикой, мы поймем впоследствии, как строится крыша, почему мост может сдерживать свою громадную тяжесть, отчего аэроплан держится в воздухе. Самые обыденные жизненные явления, мимо которых мы обычно проходим с закрытыми глазами, послужат нам интересным объектом для изучения.

§ 23. Движение. *Движением называется изменение положения одного тела относительно других.* Понятие, противоположное движению, носит наименование *покоя*.

Говоря о движении и покое, необходимо указывать, относительно какой системы тел они происходят. Положим, от пристани отошел пароход. Так как пароход меняет свое положение относительно берегов, то можно сказать, что он находится в движении. Пассажиры двигаются вместе с пароходом относительно берегов реки, хотя относительно самого парохода они могут пребывать в покое.

Когда тело одновременно участвует в нескольких движениях, то говорят, что оно совершает *сложное движение*. Если вы ходите по набережной плывущего парохода, то вы совершаете одновременно два движения: во-первых, вместе с пароходом относительно берегов, а во-вторых, относительно самого парохода. Если вы при этом размахиваете рукой, то ваша рука помимо двух указанных движений относительно берегов и относительно парохода еще участвует в третьем движении — относительно вашего тела. А если по вашей руке ползет муха, то она совершает сверх того еще четвертое движение — относительно руки.

Путь, по которому движется тело, носит название *траектории движения*. Траектории могут быть *прямолинейные* и *криволинейные*, соответственно чему и движения будут носить названия *прямолинейных* или *криволинейных*.

§ 24. Равномерное движение. Скорость движения. *Равномерным движением называется такое движение, при котором тело в равные, весьма малые, произвольно выбранные промежутки времени проходит равные расстояния.*

Будет ли движение, совершаемое маятником часов, равномерным, ведь он каждую секунду проходит одинаковый путь? Конечно, нет. Разобьем каждую секунду на ряд равных более мелких промежутков времени, например, по 0,01 секунды. Если отметить путь, пройденный маятником за 0,01 секунды в то время, когда он находится вблизи крайнего положения, и сравнить его с пространством, проходимым маятником также за 0,01 секунды, но в то время, когда маятник находится вблизи среднего положения, то окажется, что эти расстояния не одинаковы и, следовательно, движение маятника не может быть признано равномерным.

Скоростью при равномерном движении называется физическая величина, измеряемая расстоянием, проходимым телом за единицу времени.

Пусть пароход, двигаясь равномерно, за 30 секунд прошел расстояние в 180 метров. Скорость его движения в таком случае будет равна:

$$\frac{180}{30} = 6 \text{ метров в секунду.}$$

Наименование тех единиц, в которых измеряется скорость, обычно пишется в виде дроби, числитель которой указывает на единицы длины, коими измеряется пройденный путь, а знаменатель — на единицы времени. В нашем примере скорость движения парохода равна 6 м/сек.

В физике обычно скорость движения измеряется в см/сек, в обычной жизни скорость часто измеряется в км/час.

Приводим примеры некоторых скоростей движения.

Виды движения	Скорость	
	см/сек	км/час
Пловец (в среднем)	100	3,6
Пешеход (в среднем)	150	5,4
Велосипедист (средн. темпом)	450	16,2
Океанский пароход «Мавритания»	1 280	46,25
Курьерский поезд	2 500	90,0
Самый сильный ураган	7 000	250
Аэроплан (наибольшая скорость)	12 500	450
Звук в воздухе при 0°	33 200	1097
Точка экватора при движении земного шара вокруг оси	46 000	1290
Свет	300 000	км/сек.

Обозначим через S путь, пройденный телом за t секунд, а скорость его движения через V .

Из определения скорости следует, что

$$V = \frac{S}{t},$$

или

$$S = Vt,$$

т. е. пройденный путь при равномерном движении равен скорости, умноженной на время движения.

§ 25. Инерция. Все тела обладают одним общим свойством — стремлением сохранить свое первоначальное состояние. Это свойство носит название — *инерция*, что в переводе на русский язык буквально значит «косность», «недеятельность».

На столе лежит карандаш. Вполне понятно, что он останется в покое до тех пор, пока вы его не передвинете, сам же он не начнет двигаться.

Вы стоите в трамвае. Вагоновожатый приводит трамвай в быстрое движение. Происходит толчок и вы падаете. Ваше тело было в покое, по инерции оно стремится сохранить это состояние, но пол трамвая, а вместе с ним и ваши ноги вдруг начали быстро двигаться — вы падаете назад.

Если вагоновожатый резко затормозит, вы упадете лицом вперед. Во время движения трамвая вместе с ним двигалось и ваше тело, стремясь по инерции продолжать это движение. Пол трамвая, а вместе с ним и ваши ноги при торможении останавливаются, тогда как тело стремится продолжать движение, что и служит причиной вашего падения.

Знаменитый английский ученый Ньютон такими словами выразил закон инерции: *Всякое тело стремится сохранить состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока какая-нибудь причина не выведет его из этого состояния* (первый закон Ньютона).

Первая часть закона никаких затруднений не представляет. Вполне понятно, что тело, находящееся в покое, будет сохранять это состояние и само не начнет двигаться. Вспомните наш пример с карандашом.

Вторая часть закона на первый взгляд кажется не соответствующей действительности. Закон говорит, что тело, имеющее равномерное и прямолинейное движение, будет таким образом двигаться вечно, до тех пор, пока какая-нибудь причина это движение не изменит. Между тем в природе мы обычно видим, что всякое движущееся тело, если на него не действует сила, в конце концов останавливается. Если мы толкнем ногою камень, т. е. приведем его в движение, то заметим, что это движение будет продолжаться не долгое время, так как камень очень скоро остановится. Стреляя из ружья, мы убеждаемся в том, что пуля постепенно замедляет скорость своего полета (на излете она бьет слабее, чем при вылете), а затем совсем останавливается и упадет на землю. Чем это можно объяснить?

Дело в том, что мы совершенно упустили из виду *трение*, т. е. зацепление неровностей тела за неровности поверхности, по которой

оно движется, и *сопротивление воздуха*. Чем меньше трение и сопротивление воздуха, тем дольше будет двигаться раз приведенное в движение тело. В случае же отсутствия сопротивления тела, получившее только один первоначальный толчок, должно двигаться вечно, равномерно и прямолинейно, так как у него нет причины изменить такое движение.

§ 26. Сила. Измерение сил. *Причина, преодолевающая инертность тела и заставляющая его изменять свое первоначальное состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, носит название силы.*

Можно привести множество примеров различных сил.

Карандаш на вашем столе был в покое. Сила ваших мускулов преодолела его инертность, т. е. стремление сохранить свой покой, и привела в движение.

Сила трения заставила остановиться катившийся камень, т. е. преодолела его стремление продолжать по инерции свое движение.

Сила мускулов лошади приводит в движение повозку, она же меняет скорость ее движения. При скатывании повозки с горы лошадь напрягает силу, чтобы удержать ее от слишком быстрого движения.

Желая узнать, кто из данных людей сильнее, мы заставляем их поднимать тяжести и признаем сильнейшим того, кто может поднять наибольший груз. Так же и в физике *силы измеряются единицами веса*, т. е. граммами, килограммами и тоннами.

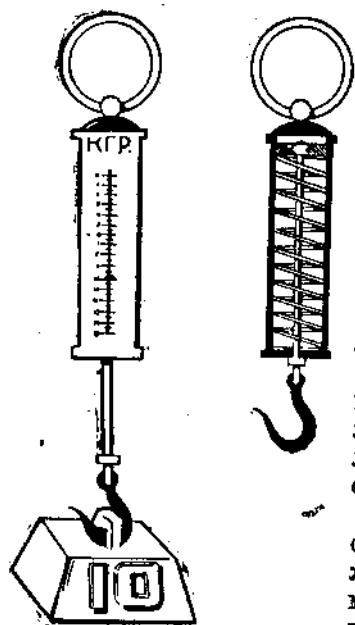


Рис. 8.

На рис. 8 изображены знакомые всем пружинные весы, называемые иначе *динамометром*, которыми очень удобно пользоваться для измерения сил. Для определения величины той силы, с которой, например, человек тянет санки, следует прикрепить крючок динамометра к веревке и тянуть за кольцо. Если указатель остановился на 10-м делении, то это значит, что к санкам приложена сила, равная 10 кг, так как груз весом в 10 кг сдвигивает пружину динамометра и доводит указатель до этого же деления.

§ 27. Графическое изображение сил. Вполне ли вы будете осведомлены о какой-нибудь силе, если вам известна только ее величина, т. е. скольким весовым единицам она равноценна? — Конечно нет. Когда я толкаю телегу в ту сторону, куда везет ее лошадь, я помогаю ей, если же я прикладываю силу в противоположную сторону, я ей противодействую. Следовательно, говоря о силе, необходимо указать и *направление ее действия*.

Посмотрите на рис. 9. Вы видите подсвечник со свечой. Что про-

изойдет, если вы приложите силу к его нижней части, как показано на рисунке?

Подсвечник будет двигаться в направлении этой силы.

Приложите теперь ту же силу, но к верхней части подсвечника. Подсвечник будет опрокидываться (рис. 10).

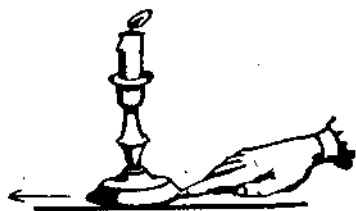


Рис. 9.

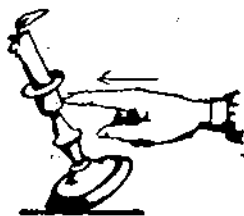


Рис. 10.

Итак, результат действия силы может быть совершенно другой, если изменится место, к которому она приложена (точка приложения). Значит, говоря о силе, нужно указать и *точку ее приложения*.

Очень удобно изображать силы графически, в виде отрезки прямой со стрелкой на конце, длина которого пропорциональна величине силы, направление совпадает с направлением силы, а начало отмечает точку приложения.

Положим, на тело, изображенное на рис. 11, действуют три силы: 1) 5 кг, 2) 3 кг, 3) 6 кг. Выберем удобный для нас масштаб, примем, например, за 1 кг отрезок AB . Затем от точки M , к которой приложена первая сила, отложим в направлении ее действия отрезок, равный 5 единицам длины, и на его конце поставим стрелку, от точки приложения второй силы (N) отложим в направлении ее действия 3 единицы длины и т. д.

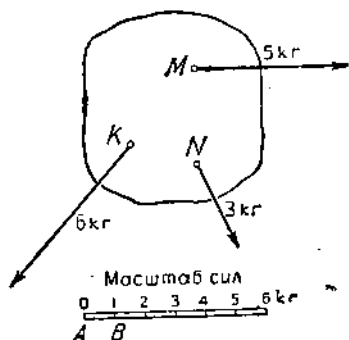


Рис. 11.

Так как сила является результатом действия одного тела на другое, то необходимо всегда, изображая силу, показывать также и то тело, на которое она действует. Следует помнить, что отдельно от тел сил не существует.

§ 28. Задачи. 15. Пароход «Левнафан» развивает скорость 47,5 км/час. Переведите эту скорость в см/сек.

16. С какой скоростью бежит человек, если в 15 минут он пробежал расстояние в 2400 м? Выразите эту скорость в км/час и в см/сек.

17. В американских небоскребах движение лифтов происходит со скоростью 8,4 м/сек. Сколько времени поднимается лифт в 49-й этаж небоскреба «Метрополитен», высота которого над поверхностью земли 210 м?

18. Автомобиль движется со скоростью 75 км/час. Какое расстояние пройдет он: а) за 10 секунд, б) за 15 минут, в) за 2 часа 24 мин?

19. С какой средней скоростью движется автомобиль, если расстояние в 280 км он проехал в 5 час. 12 мин?

20. Через сколько времени человек услышит звук выстрела, произведенного от него на расстоянии 2 км, если скорость распространения звука 332 м/сек?

21. Скорость течения в ды 6 км/час. На какое расстояние отнесет течение плавающее в воде тело за 12 мин?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

СЛОЖЕНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ СИЛ.

§ 29. Равновесие сил. Вгляните на рис. 12. Вы видите две гири A и B равного веса, привязанные к веревкам, перекинутым через

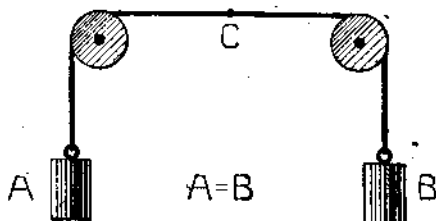


Рис. 12.

блоки. Концы веревок связаны вместе узлом C . Узел натягивается двумя равными и противоположными силами, а так как ему нет причины двинуться в одну сторону более, чем в другую, то он и остается на месте. Итак, две равные и прямопротивоположные силы могут быть рассматриваемы как противодействующие друг другу; каждая из них

уничтожает то движение, которое могла бы дать другая.

Мы можем сказать, что узел C находится в равновесии под влиянием двух сил, противодействующих друг другу.

§ 30. Сложение сил, направленных по одной прямой. Изменим только-что сделанный опыт. К одной веревке, например, левой, под-

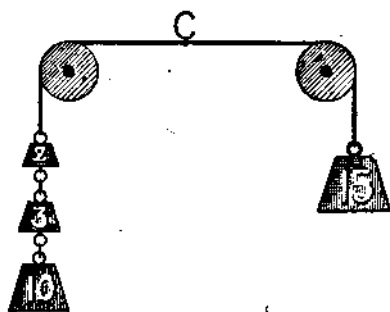


Рис. 13.

в сим не один, а несколько грузов, хотя бы в 2 кг, 3 кг и 10 кг (рис. 13).

На узел C действуют влево три силы: 1) 2 кг, 2) 3 кг, 3) 10 кг,

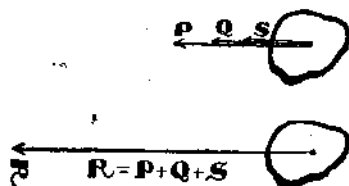


Рис. 14.

направленные по одной прямой. Чтобы уравновесить их действие и добиться того, чтобы узел остался в покое, придется подвесить к концу правой веревки гирию в 15 кг. Вместо того чтобы слева подвешивать три гири в 2, 3 и 10 кг, мы могли бы подвесить одну гирию в 15 кг. Итак, сила в 15 кг производит такое же действие, как сумма сил 2 кг + 3 кг + 10 кг, направленных по одной прямой и в одну сторону. Силу 15 кг можно назвать *равнодействующей* указанных трех сил. В общем случае (рис. 14) *равнодействующая сила $P + Q + S$ будет*

сила R , равная их сумме, приложенная к той же точке и направленная в их сторону.

Прделаем еще опыт. Подвесим слева гирию в 15 кг, а справа гирию в 5 кг. Чтобы сохранить равновесие, нам придется добавить справа еще гирию в 10 кг. Из этого мы можем заключить, что на узел C действует влево сила также в 10 кг, а следовательно она является равнодействующей сил в 15 и 5 кг, направленных по одной прямой, но в противоположные стороны. В общем случае *равнодействующая двух сил P и Q* (рис. 15), направленных по одной прямой в противоположные стороны, *сила K равна их разности $P - Q$ и направлена в сторону большей силы.*

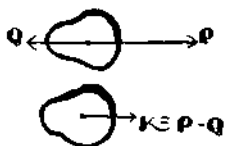


Рис. 15.

§ 31. Сложение сил, действующих под углом. К концам достаточно длинной нити, перекинутой через блоки, подвесим какие-нибудь гири, хотя бы слева $F = 4$ кг и справа $E = 3$ кг (рис. 16). К произвольной точке нити D между блоками подвесим груз $C = 5$ кг — нить несколько двинется, а затем остановится в некотором положении. Если мы передвинем точку D в ту или иную сторону, то она опять вернется в прежнее положение, которое, следовательно, и является положением равновесия.

К стойке, на которой помещена подставка с блоками, прибита доска с листом бумаги. Отметим на нем то место, против которого

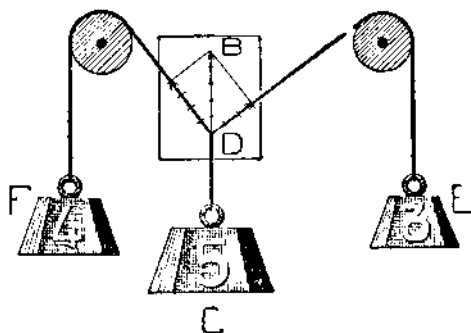


Рис. 16.

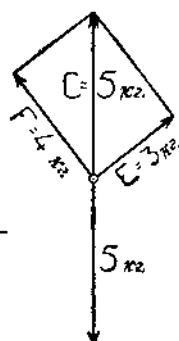


Рис. 17.

приходится точка D , и построим, пользуясь уже известным нам способом, те силы, которые на нее действуют, т. е. отложим вдоль направления силы E три единицы длины, вдоль направления силы F — четыре единицы и по направлению силы C — пять единиц.

Если мы затем из конца силы E проведем линию, параллельную направлению силы F , а из конца силы F — линию, параллельную направлению силы E , то полученная фигура будет представлять собой параллелограм (см. рис. 17).

Измерив диагональ его DB , мы заметим, что она равна 5 единицам длины и направлена прямопротивоположно силе $C = 5$ кг, уравновешивающей две силы E и F , т. е. мы приходим к выводу, что

силы E и F могут быть заменены одной равнодействующей DB , равной диагонали параллелограмма, построенного на этих силах.

Проделав несколько раз подобные опыты с различными грузами, заметим, что всегда *равнодействующая двух сил, приложенных к одной точке и действующих под углом, равна диагонали параллелограмма, построенного на этих силах* (правило параллелограмма сил).

Примечание. Из геометрии известно, что сторона треугольника меньше суммы двух других сторон но больше их разности, следовательно, и равнодействующая двух сил, приложенных к одной точке и действующих под углом, по своей величине всегда меньше их суммы, но больше разности.

§ 32. Многоугольник сил. Пусть на тело в точке O (рис. 18) действует несколько сил: K, L, M, N, P . Требуется найти их равнодействующую.

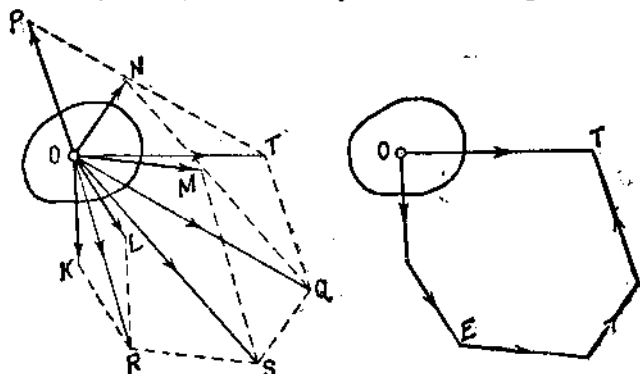


Рис. 18.

Найдем сначала равнодействующую двух сил, например, K и L —это будет диагональ R параллелограмма $KOLR$, построенного на этих силах.

Полученную таким образом силу R и третью силу M мы заменим одной равнодействующей S и т. д.; наконец, получим силу T , которая и будет равнодействующей всех указанных сил.

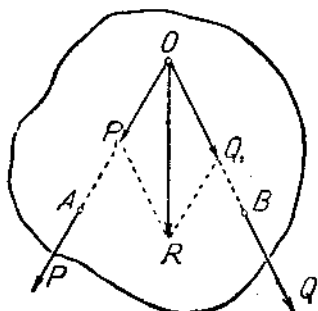


Рис. 19.

Совершенно к такому же результату мы могли прийти, построив так называемый *многоугольник сил*. Если из конца 1-й силы провести линию, параллельную 2-й силе, и отложить ее величину, из полученной точки E провести линию, параллельно 3-й силе, и отложить ее величину и т. д., *равнодействующая всех сил будет равна замыкающей стороне этого многоугольника*.

Сравнивая левую и правую части рис. 18, не трудно убедиться в справедливости изложенного.

Как показывает опыт, *перенос точки приложения силы по линии ее действия не влияет на движение, вызываемое этой*

силой, что даст нам возможность в случае необходимости переносить силу по линии ее действия. На рис. 19 изображено тело, на которое действуют две силы P и Q , направленные под углом и приложенные не к одной точке.

Чтобы найти их равнодействующую, продолжим линии действия сил до точки пересечения, куда затем и перенесем эти силы; пользуясь далее правилом параллелограмма, мы легко построим их равнодействующую R .

§ 33. Разложение сил. К гире A привяжем две веревки, конец каждой из них прикрепим к крючкам двух пружинных весов (рис. 20). Закрепим затем колечки этих весов неподвижно в точках C и D и отпустим гирю. Каждая из веревок будет натянута силой, величину которой мы определим по соответствующему показанию весов. Предположим, наша гиря весила 10 кг, а показания весов были 8 кг и 3 кг.

Так как узел веревки E , к которому приложены три силы — 10 кг, 8 кг и 3 кг, находится в покое, то, следовательно, эти силы уравновешивают друг друга, т. е. сила веса гири 10 кг могла быть уравновешена двумя силами — в 8 кг и в 3 кг. Следовательно, равнодействующая сил 8 кг и 3 кг равна и прямо противоположна силе 10 кг.

Не трудно убедиться на опыте, что сила в 10 кг равна по величине диагонали параллелограмма, сторонами которого служат силы 8 кг и 3 кг.

Таким образом, если нам впоследствии нужно будет разложить одну силу на две, равноценные ей в сумме, мы, приняв эту силу за диагональ, построим на ней стороны параллелограмма.

Однако задача разложения одной силы на две на основании правила параллелограмма допускает бесчисленное множество решений, так как на данной диагонали можно построить множество параллелограммов.

Для определенности решения задачи необходимо получить некоторые указания. Нужно знать: или 1) направления, в которых действуют составляющие силы, или 2) одну из составляющих сил по величине и направлению, или 3) обе силы по величине.

Примеры разложения сил.

1. Прodelайте сами такой опыт. Натяните крепкую веревку, способную выдержать тяжесть в 10 — 15 кг, к ее середине привяжите один конец нитки и сильно потяните за другой ее конец (рис. 21).

Что-то оборвалось... Однако, как странно, оказывается, что лопнула крепкая веревка, а более слабая нитка осталась цела. В чем же дело? Взгляните на рис. 22, он даст вам объяснение. Сила P , приложенная вами к нитке, была недостаточно велика, чтобы ее разорвать: эта сила передавалась веревке, заставляла ее натянуться и вызвала в ней силы Q и S , стремящиеся уравновесить силу P ; их равнодействующая R равна и прямо противоположна силе P .

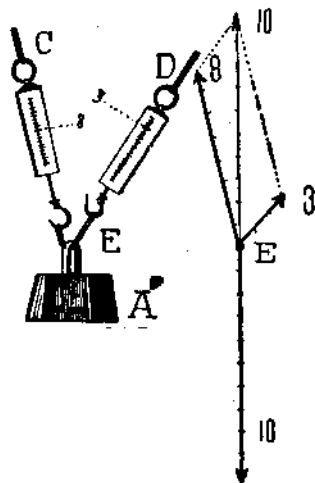


Рис. 20.

Так как получится параллелограмм с очень тупым углом, то стороны его выражающие силы Q и S , очень велики по сравнению с диагональю R , равной и прямопротивоположной силе P . Эти сравнительно большие силы Q и S разорвали веревку.

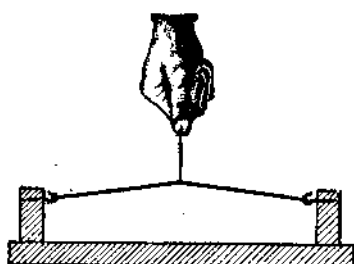


Рис. 21.



Рис. 22.

параллелограмма, разложим силу P на две составляющие, направленные вдоль подкосов, — они и представляют собой искомые усилия.

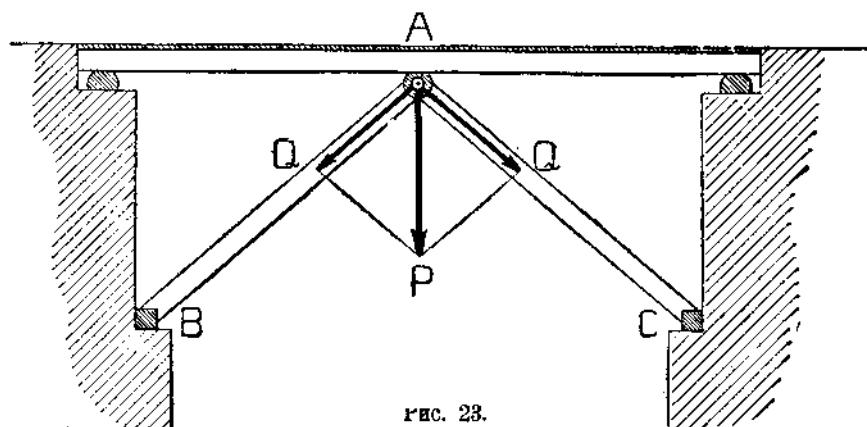


рис. 23.

3. Может быть, вам приходилось кататься на парусной лодке? Попробуем разобрать, каким образом сила ветра может заставить двигаться лодку в направлении почти противоположном направлению ветра. Предположим, ветер дует в направлении, указанном стрелкой. Если мы поставим парус ребром к ветру, то ветер будет только скользить по парусу и не произведет никакого толкающего действия, если же мы поместим парус перпендикулярно направлению ветра, то ветер будет относить лодку в сторону. Расположим парус так, как это показано на рис. 24. Разложим силу ветра P на две взаимноперпендикулярные силы K и L — одну вдоль паруса (она не произведет давления), а другую перпендикулярно ему. Эту вторую силу, которая и будет толкать парус, в свою очередь разложим на две взаимноперпендикулярные силы Q и S . Сила Q будет стремиться сообщать лодке движение вбок, но вследствие большого сопротивления воды она будет только немного смещать ее в сторону, сила же S приведет лодку в движение.

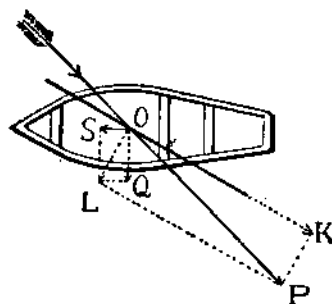


Рис. 24.

§ 34. Равнодействующая двух параллельных сил, направленных в одну сторону. На рис. 25 изображено тело, на которое дей-

ствуют две параллельные силы P и Q , приложенные в точках A и B . Найти равнодействующую этих сил по способу, указанному на стр. 31, нельзя, так как при продолжении эти силы не пересекаются.

Приложим в точке A произвольную силу K_1 , направленную по прямой AB . В точке B приложим равную и прямопротивоположную ей силу K_2 . Силы K_1 и K_2 уравновешивают друг друга, вследствие чего их приложение не изменит действие на тело сил P и Q .

Найдем равнодействующую сил P и K_1 , воспользовавшись правилом параллелограмма сил. Это будет сила T .

Аналогично найдем равнодействующую сил Q и K_2 . Это будет сила S .

Продолжим линии действия сил T и S до их пересечения в точке O , куда и перенесем эти силы. В точке O вновь разложим силу T на составляющие P и K_1 , а силу S на составляющие Q и K_2 . Таким образом, мы получим в точке O четыре силы: P , K_1 , Q и K_2 . Силы K_1 и K_2 взаимно уравновешиваются, равнодействующая же R сил P и Q , действующих по одной прямой и направленных в одну сторону, очевидно, равна их сумме $P+Q$.

Точка приложения этой равнодействующей R может быть перенесена по линии ее действия в точку C пересечения ее направления с линией AB .

Из подобия треугольников OAC и ODE имеем:

$$\frac{DF}{AC} = \frac{OF}{OC}$$

откуда

$$DF \cdot OC = OF \cdot AC. \quad (*)$$

Из подобия треугольников OCB и OZM аналогично имеем:

$$\frac{ZM}{CB} = \frac{OZ}{OC}$$

откуда

$$ZM \cdot OC = OZ \cdot CB. \quad (**)$$

Сравнивая равенства (*) и (**), отмечаем, что у них равны левые части, так как $ZM = DF$, следовательно равны и правые части:

$$OF \cdot AC = OZ \cdot CB,$$

или

$$P \cdot AC = Q \cdot CB,$$

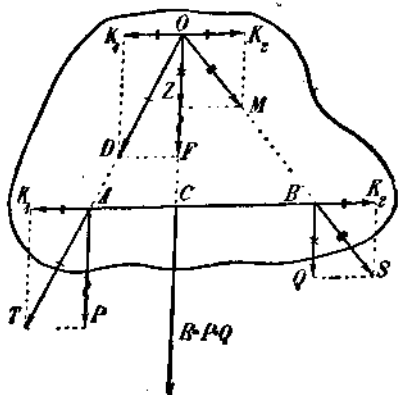


Рис. 25.

так как отрезок OF представляет силу P , а отрезок OZ — силу Q , откуда

$$\frac{AC}{CB} = \frac{Q}{P}.$$

Таким образом, мы приходим к выводу, что *равнодействующая двух параллельных сил, направленных в одну сторону, равна их сумме, параллельна им и направлена в ту же сторону. Точка приложения равнодействующей лежит на прямой, соединяющей точки приложения данных сил в расстояниях от этих точек, обратно пропорциональных величинам сил.*

Пример. Пусть сила $P = 10$ кг, сила $Q = 3$ кг, а расстояние между их точками приложения $AB = 39$ см. Требуется найти их равнодействующую.

Воспользовавшись приведенным выше правилом, находим, что равнодействующая $R = 10 + 3 = 13$ кг, параллельна им и направлена в ту же сторону, что силы P и Q . Назовем расстояние точки ее приложения C до точки A через x см; в таком случае расстояние этой точки C до точки B будет равно $(39 - x)$ см. Составляем пропорцию:

$$\frac{x}{39 - x} = \frac{3}{10}.$$

откуда

$$\begin{aligned} 10x &= (39 - x) \cdot 3, \\ 13x &= 117 \end{aligned}$$

и

$$x = 9 \text{ см.}$$

т. е. расстояние точки приложения равнодействующей C от точки A равно 9 см, а от точки B равно $39 - 9 = 30$ см.

Стержень AB подвешен на двух нитях, концы которых перекинуты на двух блоках, и уравновешен двумя гирьками S и T (рис. 26). Если к этим нитям привесить еще гири весом P и Q , то стержень будет подниматься вверх. Чтобы удержать его на месте, к стержню необходимо привесить гирю R , равную сумме весов гирь P и Q . Передвигая ее вдоль стержня AB , находим такое положение этой гири в точке C , при котором стержень находится в равновесии. Если измерить расстояние этой точки C до точек A и B , то окажется, что эти расстояния обратно пропорциональны весам гирь P и Q , т. е.

$$\frac{AC}{CB} = \frac{Q}{P},$$

т. е. вывод, сделанный нами теоретическим путем, вполне совпадает с результатом опыта.

§ 35. Разложение силы на две параллельных составляющих. Одну силу можно заменить двумя параллельными составляющими. Подобная задача допускает бесчисленное множество решений. Для определенности решения этой задачи необходимо указать или 1) рас-

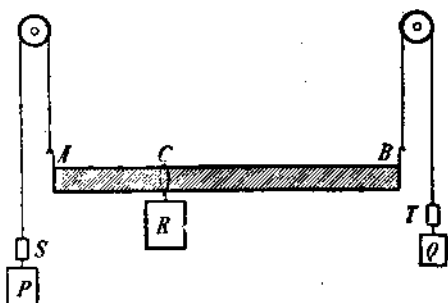


Рис. 26.

стояния от точки приложения заданной силы до точек приложения составляющих сил, или 2) одну составляющую силу по величине и расстояние ее точки приложения от точки приложения заданной силы.

Приведем примеры разложения сил.

1. На доске, перекинутой через ручей, стоит человек, вес которого равен 80 кг. Требуется узнать, какое давление передается от этого веса опорам, на которых лежит доска. Расстояние до левой опоры 12 м, до правой опоры 8 м.

Задача сводится к разложению силы 80 кг на две параллельные составляющие, находящиеся на расстояниях 12 м и 8 м от равнодействующей. Назовем одну из этих сил через x кг, в таком случае вторая сила будет равна $(80 - x)$ кг.

Составляем пропорцию:

$$\frac{x}{80 - x} = \frac{8}{12};$$

$$12x = 8(80 - x),$$

откуда

$$x = 32 \text{ кг.}$$

Итак, на левую опору передается давление в 32 кг, а на правую $80 - 32 = 48$ кг.

2. Два человека несут на палке ведро с водою весом 12 кг. Один из них держит палку на расстоянии 30 см от места, где подвешено ведро (точка А), при этом он испытывает давление в 9 кг. Требуется выяснить, какое давление от ведра испытывал второй и на каком расстоянии x от точки А он держал палку.

Очевидно, силу 12 кг нужно разложить на две параллельные составляющие так, чтобы одна из них была равна 9 кг и находилась на расстоянии 30 см.

Вторая сила будет равна

$$12 - 9 = 3 \text{ кг.}$$

Расстояние x можно найти из пропорции:

$$\frac{x}{30} = \frac{9}{3}; \quad 3x = 9 \cdot 30,$$

$$x = 90 \text{ см.}$$

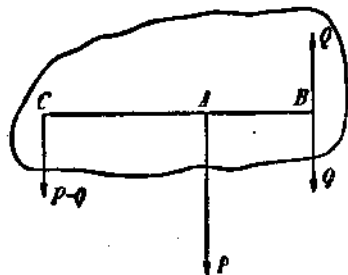


Рис. 27.

§ 36. Сложение двух параллельных сил, направленных в разные стороны. Даны параллельные силы P и Q , приложенные к точкам А и В и направленные в разные стороны (рис. 27). Для нахождения их равнодействующей разложим большую силу P на две составляющие так, чтобы одна из них была по величине равна силе Q , а по направлению ей противоположна и была приложена к точке В.

В таком случае вторая сила равна

$$P - Q$$

и будет приложена в некоторой точке C . Расстояние точки C от точек A и B можно найти из пропорции:

$$\frac{CA}{AB} = \frac{Q}{P-Q},$$

откуда

$$CA(P-Q) = AB \cdot Q,$$

или

$$CA \cdot P - CA \cdot Q = AB \cdot Q,$$

т. е.

$$CA \cdot P = (AB + CA) Q,$$

но

$$AB + CA = CB,$$

следовательно,

$$CA \cdot P = CB \cdot Q,$$

откуда

$$\frac{CA}{CB} = \frac{Q}{P}. \quad (*)$$

Сила Q уравновесит равную и прямопротивоположную силу Q . Останется одна сила $R = P - Q$, точка приложения которой может быть найдена на основании пропорции (*).

Таким образом, мы приходим к выводу, что *равнодействующая двух параллельных сил P и Q , направленных в разные стороны, равна их разности, параллельна им и направлена в сторону большей силы. Точка ее приложения лежит на продолжении прямой, соединяющей точки приложения данных сил (со стороны большей силы) в расстояниях от этих точек, обратно пропорциональных величинам сил.*

§ 37. Пара сил. Две разные параллельные силы P и Q (рис. 28), направленных в разные стороны, носят название пары сил.

Пара сил стремится вращать тело, на которое она действует, до тех пор, пока пря-

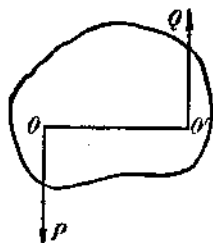


Рис. 28.

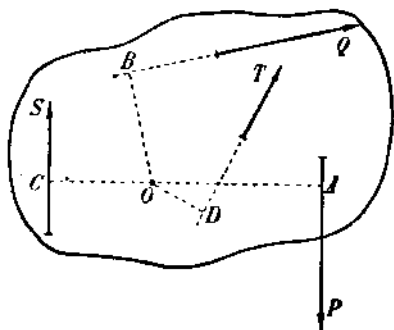


Рис. 29.

мая, соединяющая их точки приложения, не примет того же направления, что и эти силы.

Кратчайшее расстояние между этими силами, т. е. длина перпендикуляра OO' , носит название *плеча пары сил*.

§ 38. Момент силы. На рис. 29 изображено тело, на которое дей-

ствуют силы P, Q, S и T . Если это тело может вращаться около точки O , то силы будут стремиться повернуть его.

От чего зависит вращающее действие силы? Несомненно, от двух причин: величины самой силы и расстояния ее до точки, около которой происходит поворот тела. Попробуйте закрывать дверь, нажимая рукой на различные ее части, вы заметите, что чем дальше от оси ее вращения вы будете прикладывать силу, тем легче вам будет прикрывать дверь.

Вращающее действие силы измеряют *моментом силы*.

Моментом силы относительно какой-либо точки называют произведение силы на длину перпендикуляра, опущенного из этой точки на направление действия силы. Это расстояние носит название плеча силы. Кратко можно сказать, что момент силы относительно точки есть произведение величины этой силы на соответствующее плечо.

Моменты сил P, Q, S и T относительно точки O будут $P \times \overline{OA}, Q \times \overline{OB}, S \times \overline{OC}, T \times \overline{OD}$, ибо расстояния $\overline{OA}, \overline{OB}, \overline{OC}, \overline{OD}$ будут являться для сил P, Q, S и T соответствующими плечами.

Если вращение, производимое силой, происходит в направлении движения часовой стрелки, то момент силы считается *положительным*; если же вращение происходит в обратном направлении, то момент считается *отрицательным*. На нашем рисунке силы P, Q и S дают положительные моменты, а сила T отрицательный момент.

§ 39. Момент равнодействующей равен алгебраической сумме моментов сил составляющих. Пусть на тело (рис. 30) действуют две параллельных силы P и Q , приложенные к точкам A и B . Их равнодействующая R приложена к точке C и равна их сумме:

$$R = P + Q. \quad (*)$$

Возьмем произвольную точку O и умножим обе части равенства (*) на $\overline{OC}$:

$$R \cdot \overline{OC} = P \cdot \overline{OC} + Q \cdot \overline{OC},$$

но

$$\overline{OC} = \overline{OA} + \overline{AC},$$

т. е.

$$R \cdot \overline{OC} = P(\overline{OA} + \overline{AC}) + Q \cdot \overline{OC},$$

или

$$R \cdot \overline{OC} = P \cdot \overline{OA} + P \cdot \overline{AC} + Q \cdot \overline{OC}. \quad (**)$$

На основании правила о нахождении равнодействующей двух параллельных сил P и Q имеем пропорцию

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{CB}} = \frac{Q}{P}$$

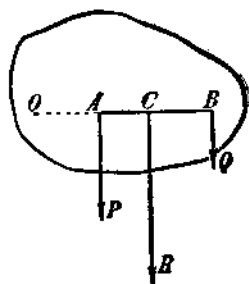


Рис. 30

или

$$P \cdot \overline{AC} = Q \cdot \overline{CB}.$$

Заменим в равенстве (**) $P \cdot \overline{AC}$ через равную величину $Q \cdot \overline{CB}$, вынесем за скобки Q :

$$R \cdot \overline{OC} = P \cdot \overline{OA} + Q(\overline{CB} + \overline{OC});$$

так как

$$\overline{CB} + \overline{OC} = \overline{OB},$$

то

$$R \cdot \overline{OC} = P \cdot \overline{OA} + Q \cdot \overline{OB},$$

т. е. момент равнодействующей силы R относительно произвольной точки O равен сумме моментов составляющих сил P и Q .

Точно так же можно доказать, что момент равнодействующих двух параллельных сил, направленных в противоположные стороны, равен алгебраической сумме моментов составляющих сил (см. решение задачи № 38).

Сделанный нами вывод также легко распространить на любое число сил, лежащих в одной плоскости.

§ 40. Нахождение равнодействующей нескольких параллельных сил. На рис. 31 изображена балка, на которую действует целый ряд параллельных сил. Силы выражены в кг, а расстояния между ними в сантиметрах.

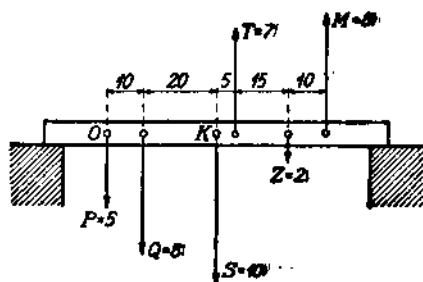


Рис. 31.

Чтобы найти их общую равнодействующую, можно было бы сначала сложить две каких-либо силы, полученную равнодействующую сложить с третьей силой и т. д.; однако, пользуясь вышеприведенной теоремой о моментах сил (см. выше), можно значительно облегчить задачу нахождения точки приложения равнодействующей.

Чтобы найти общую равнодействующую, нужно сложить все силы, направленные в одну сторону.

В нашем случае

$$5 + 8 + 10 + 2 = 25 \text{ кг.}$$

Ватем сложить силы, направленные в противоположную сторону:

$$7 + 8 = 15 \text{ кг.}$$

Из большей по абсолютному значению суммы вычесть меньшую:

$$25 - 15 = 10 \text{ кг.}$$

Таким образом мы находим, что равнодействующая всех сил, изображенных на рис. 31, равна 10 кг и направлена в сторону сил 5, 8, 10 и 2 кг.

Возьмем произвольную точку O , например, на крайней левой силе $P=5$ кг, и найдем сумму моментов всех этих сил относительно точки O .

Момент силы P относительно точки O равен	0
» » Q » » »	$8 \times 10 = + 80$ кг·см
» » S » » »	$10 \times 30 = + 300$ »
» » T » » »	$7 \times 35 = - 245$ »
» » Z » » »	$2 \times 50 = + 100$ »
» » M » » »	$8 \times 60 = - 480$ »

Все данные удобнее всего было бы записать в таблицу:

Положительные моменты	Отрицательные моменты
80 кг·см	
300 »	245 кг·см
100 »	480 »
Итого 480 »	Итого 725 »

Алгебраическая сумма моментов относительно точки O будет равна

$$+ 480 - 725 = - 245 \text{ кг·см.}$$

Момент равнодействующей также должен быть равен $- 245$ кг·см, т. е. произведение ее величины 10 кг на соответствующее плечо x должно составить $- 245$ кг·см.

Очевидно плечо равнодействующей по абсолютному значению равно

$$\frac{245}{10} = 24,5 \text{ см.}$$

Чтобы момент был равен $- 245$ кг·см, равнодействующая должна быть приложена *влево* от точки O .

Для проверки найдем положение равнодействующей, взяв сумму моментов сил относительно точки K .

Положительные моменты	Отрицательные моменты
силы Z $2 \times 20 = 40$ кг·см	силы P $5 \times 30 = 150$ кг·см
	» Q $8 \times 20 = 160$ »
	» T $7 \times 5 = 35$ »
	» M $8 \times 30 = 240$ »
Итого . . . 40 »	Итого . . . 585 »

Алгебраическая сумма моментов относительно точки K равна

$$-585 + 40 = -545 \text{ кг}\cdot\text{см.}$$

Расстояние равнодействующей *влево* от точки K :

$$\frac{545}{10} = 54,5 \text{ см}$$

или от точки O :

$$54,5 - (10 + 20) = 24,5 \text{ см,}$$

т. е. то же, что было уже получено нами.

§ 41. Момент пары сил. Момент пары сил равен произведению одной из этих сил на плечо пары. Момент пары сил, изображенной на рис. 28, равен:

$$P \cdot \overline{OO'},$$

или

$$Q \cdot \overline{OO'}.$$

§ 42. Задачи. 22. На тело действуют в одну сторону две силы в 10 и 25 кг и в противоположную сторону три силы: 2, 8 и 11 кг, приложенные к одной точке. Найти их равнодействующую.

23. Начертите и вычислите равнодействующую двух сил $P=100$ кг и $Q=200$ кг, если угол между ними $\alpha=90^\circ$.

24. То же, если $P=40$ кг, $Q=60$ кг, $\alpha=60^\circ$.

25. То же, если $P=75$ т, $Q=10$ т, $\alpha=30^\circ$.

26. То же, если $P=60$ г, $Q=100$ г, $\alpha=120^\circ$.

27. Силу 200 кг, действующую отвесно, разложите на две силы, из коих одна должна быть горизонтальной, а другая составляет с вертикалью угол в 60° .

28. На балку (рис. 32) длиной 2 м, поддерживаемую тросом длиной 2,3 м, подвешен груз в 1500 кг. Какие силы действуют на трос и балку?

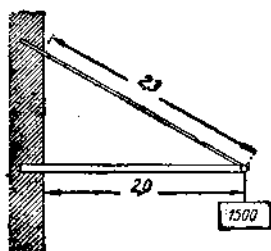


Рис. 32.

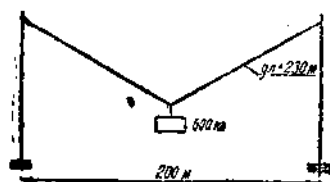


Рис. 33.

29. На проволоочном канате длиной 230 м, протянутом между двумя столбами (рис. 33), расстояние между которыми равно 200 м, подвешен груз весом 600 кг. Найти натяжение каната.

30. Разложите силу $P=10$ кг на две составляющие, параллельные ей и направленные в одну сторону, так, чтобы они были на расстоянии 1,5 м и 3,5 м от точки приложения равнодействующей.

31. Разложите силу $P=15$ кг на две составляющие Q и S , параллельные ей и направленные в разные стороны, так, чтобы одна из них Q была равна 20 кг направлена в сторону силы P и ее точка приложения находилась на расстоянии 75 см от точки приложения силы P .

32. К концам стержня, имеющего длину 4 м, подвешены грузы в 50 кг и 30 кг. В какой точке надо подпереть этот стержень, чтобы он был в равновесии?

33. Балка длиной 10 м лежит на двух опорах. На расстоянии 2 м от левой опоры на балку положен груз весом 20 т. Определить давление балки на опоры (собственный вес балки в расчет не принимается).

34. Железная балка площадью сечения 10 см^2 и длиной 2 м лежит на двух опорах. Какое давление производит балка на каждую из опор?

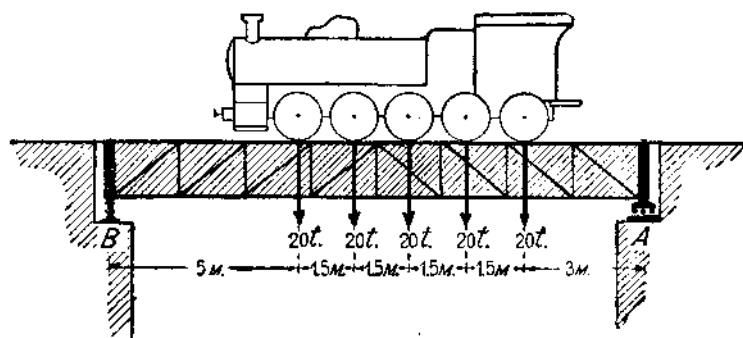


Рис. 34.

35. На балку предыдущей задачи положен груз весом 50 кг на расстоянии 80 см от левой опоры. Определить давление на опоры.

36. На балке длиной 5 м лежат четыре груза:

$P = 100 \text{ кг}$	на расстоянии 1 м	от левой опоры,
$Q = 120 \text{ »}$	» » »	2 » » »
$R = 80 \text{ »}$	» » »	3,5 » » »
$S = 150 \text{ »}$	» » »	4 » » »

Найти давление на опоры (собственный вес балки в расчет не принимается).

37. На рис. 34 изображен паровоз, стоящий на небольшом балочном мосту на двух опорах. Каждая его ось производит давление, отмеченное на рис. 34 в виде соответствующей силы. Какое давление испытывают опоры этого моста? Собственный вес моста в расчет не принимайте.

38. Докажите, что момент равнодействующей двух параллельных сил P и Q , направленных в разные стороны (рис. 35), равен алгебраической сумме моментов сил составляющих.

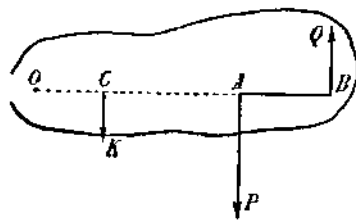


Рис. 35.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ.

§ 43. Скорость при неравномерном движении. Ускорение. Мы уже отмечали, что движения можно разделить на равномерные и неравномерные. С равномерным движением мы познакомились в гл. III. Рассмотрим теперь некоторые случаи неравномерного движения.

Если мы станем измерять расстояния, проходимые неравномерно движущимся телом в течение одной секунды, мы получим так называемые *средние скорости*.

Но на протяжении самой секунды скорость при неравномерном движении также претерпевает изменение. Вспомните наш пример с маятником. Как охарактеризовать скорость в данный момент времени?

Скоростью в данный момент времени при неравномерном движении называют ту скорость, с которой стало бы двигаться тело, если бы с этого момента оно пришло в равномерное движение.

Изменение скорости за единицу времени носит название среднего ускорения.

Пусть в некоторый момент времени скорость тела была 10 см/сек. По истечении 5 секунд скорость стала 25 см/сек. Если за 5 секунд скорость возросла на $25 - 10 = 15$ см/сек, то за 1 секунду это изменение скорости будет в 5 раз меньше и составит 3 см/сек².

Таким образом, чтобы найти ускорение, нужно разделить величину, на которую изменилась скорость в течение некоторого промежутка времени, на продолжительность этого промежутка.

Так как скорость измеряется в см/сек, то ускорение, которое получается как частное от деления изменения скорости на время, очевидно, выражается в см/сек².

Если бесконечно уменьшать продолжительность промежутка времени, то предел отношения изменения скорости за этот промежуток к его продолжительности носит название *ускорения в данный момент времени*.

§ 44. Равноускоренное движение. Движение, совершаемое с постоянным ускорением, носит название равноускоренного.

Приведем пример равноускоренного движения. Пусть скорости в начале каждой последующей секунды были таковы:

Скорость в начале 1-й секунды		3 см/сек
» » » 2-й		7 »
» » » 3-й		11 »
» » » 4-й		15 »
» » » 5-й		19 »
» » » 6-й		23 »

Очевидно мы имеем движение с ускорением в 4 см/сек².

Выведем формулу равноускоренного движения.

Пусть тело, имея скорость V_0 , начало двигаться равноускоренно, т. е. каждую секунду скорость его возрастала на величину ускорения a .

По истечении 1 секунды тело имеет скорость	$V_0 + a$,
» » 2 » » » »	$V_0 + 2a$,
» » 3 » » » »	$V_0 + 3a$.

Через t секунд скорость V_t будет равна:

$$V_t = V_0 + at. \quad (1)$$

Во время движения скорость возрастала от V_0 до V_t . Так как изменение скорости происходило с одинаковой быстротой, то для вычисле-

ния пройденного пути за t секунд можно ввести в расчет среднюю скорость за этот промежуток времени, т. е.

$$v = \frac{V_0 + V_t}{2}$$

или, подставляя вместо V_t его значение

$$v = \frac{V_0 + V_0 + ct}{2} = V_0 + \frac{ct}{2}.$$

Путь, пройденный за t секунд, находится как произведение средней скорости на время движения, т. е.

$$\begin{aligned} \text{или} \quad S &= \left(V_0 + \frac{ct}{2} \right) t \\ S &= V_0 t + \frac{ct^2}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Найдем t из уравнения (1):

$$t = \frac{V_t - V_0}{c}.$$

Найдем также t из уравнения (2):

$$t = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 + 2cS}}{c}$$

и правиваем их

$$\frac{V_t - V_0}{c} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 + 2cS}}{c}.$$

Производя сокращение, получим:

$$V_t = \pm \sqrt{V_0^2 + 2cS}.$$

Откуда

$$V_t^2 = V_0^2 + 2cS,$$

или

$$V_t^2 - V_0^2 = 2cS. \quad (3)$$

При решении некоторых задач эта формула (3) бывает очень полезна.

§ 45. Равноускоренное движение без начальной скорости. Приравняв в формулах (1), (2) и (3)

$$V_0 = 0,$$

имеем следующие формулы для равноускоренного движения без начальной скорости:

$$V_t = ct, \quad (1a)$$

$$S = \frac{ct^2}{2}, \quad (2a)$$

$$V_t^2 = 2cS. \quad (3a)$$

§ 46. **Равнозамедленное движение.** Если при неравномерном движении скорость каждую секунду убывает на одну и ту же величину, то движение носит название *равнозамедленного*.

Таким образом, равнозамедленное движение отличается от равноускоренного тем, что у него ускорение отрицательно.

Подставляя в формулы равноускоренного движения вместо ускорения — c , имеем следующие формулы *равнозамедленного движения*:

$$V_t = V_0 - ct, \quad (1b)$$

$$S = V_0 t - \frac{ct^2}{2}, \quad (2b)$$

$$V_t^2 - V_0^2 = -2cS \quad \text{или} \quad V_0^2 - V_t^2 = 2cS. \quad (3b)$$

§ 47. **Графики движений.** Возьмем две взаимно перпендикулярные прямые, которые примем за координатные оси. По оси x -ов будем откладывать время (t), а по оси y -ов соответствующие скорости движения (V).

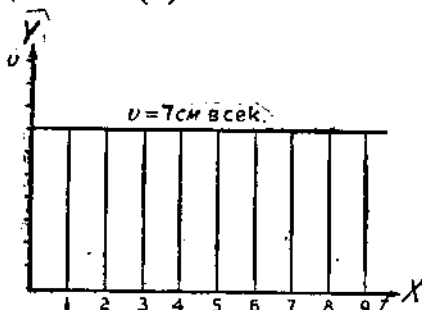


Рис. 36.

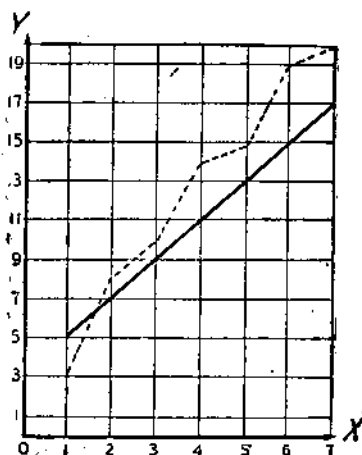


Рис. 37.

На рис. 36 показан полученный таким образом график (так называемая *линия скоростей*) для равномерного движения. Так как величина скорости при равномерном движении остается неизменной, то мы получаем прямую, параллельную оси x -ов.

На рис. 37 показаны графики (линии скоростей) ускоренных движений, т. е. таких, при которых скорость с течением времени возрастает, вследствие чего линии скоростей поднимаются вверх. Равноускоренное движение имеет линию скоростей прямую, а неравноускоренное движение кривую линию.

На рис. 38 изображены замедленные движения, характеризующиеся убыванием скорости по мере движения. Линии скоростей двух показанных на графике движений постепенно опускаются книзу, причем одна из них выражена прямой, а другая кривой линией. Первая соответствует равнозамедленному, а вторая неравнозамедленному движению.

В технике часто встречаются графики движений, где по оси x -ов откладывается время, а по оси y -ов пройденные пути. На рис. 39 изображен подобный график (*линия пространства*) для равномерного движения и для равноускоренного движения.

§ 48. Масса тел. Пусть в среде без сопротивления на тело начала действовать постоянная сила. Какое движение станет совершать тело? Будем рассматривать эту силу как ряд отдельных толчков, быстро следующих один за другим, как бы сливающихся вместе. Первый толчок приведет тело в равномерное движение, второй ускорит это движение, третий еще ускорит и т. д. В результате тело начнет двигаться равноускоренно.

От чего зависит величина ускорения, вызываемого действием силы? Конечно, прежде всего от величины самой силы: чем больше сила, тем большее ускоре-

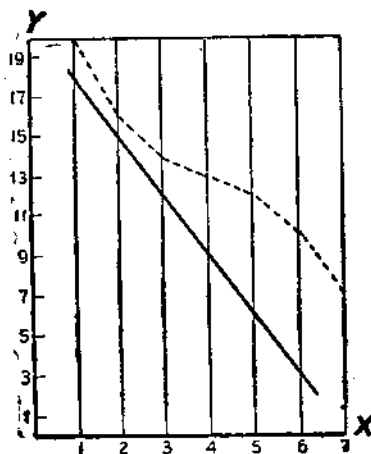


Рис. 38.

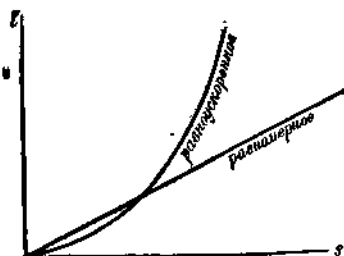


Рис. 39.

ние вызывает она. Эту связь между силой и ускорением Ньютон выразил таким законом: *Ускорение прямо пропорционально приложенной силе и имеет одинаковое с ней направление* (второй закон Ньютона).

Что еще, кроме силы, влияет на величину ускорения? То сопротивление, которое оказывает силе со стороны тела, стремящегося вследствие своей инертности сохранить первоначальное состояние. У разных тел эта инертность различна. Чем она больше, тем меньшее ускорение будет сообщать сила данному телу.

Эта инертность, т. е. *сопротивляемость силе со стороны тела, носит название массы тела*. Очень часто массу тела определяют как количество вещества в теле. Хотя это определение и страдает неточностью, но оно в значительной степени разъясняет трудное понятие о массе тела. Конечно, чем больше вещества заключается в этом теле, тем больше будет его инертность.

§ 49. Дина. Облечем в математическую форму сделанное нами заключение. Обозначим силу через f , ускорение через c , а массу тела через m . В таком случае:

$$c = k \frac{f}{m}$$

т. е. ускорение, вызываемое постоянной силой в среде без сопротивления, прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе тела. k — некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц.

За единицу массы принимается $\frac{1}{1000}$ массы интернационального прототипа из иридиевой платины, хранящегося в Севре, в Международном бюро мер и весов. Ее называют граммом массы.

За единицу силы примем такую силу, которая массе в 1 г сообщает ускорение $c = 1 \text{ см/сек}^2$. Эту силу называют динами. (Дина меньше силы в 1 грамм в 981 раз. Для приблизительного подсчета можно принимать ее равной миллиграмму.)
Итак, если

$$m = 1 \text{ г},$$

$$c = 1 \text{ см/сек}^2,$$

то

$$f = 1 \text{ дина},$$

и коэффициент k также обращается в единицу:

$$1 = k \frac{1}{1}; \quad k = 1,$$

а формула принимает вид:

$$c = \frac{f}{m},$$

или:

$$f = mc.$$

Пользуясь этой формулой, можно измерять силы в динах в зависимости от массы тела и полученного им ускорения.

Какова должна быть сила, чтобы массе тела в 10 граммов сообщить ускорение 5 см/сек^2 ? $f = 10 \times 5 = 50$ дин.

§ 50. Падение тел. Закон всемирного тяготения. Мы знаем, что все тела под влиянием силы веса падают на Землю. Какова причина существования силы веса?

Великий Ньютон первый ответил на этот вопрос. Изучая законы движения планет, провозглашенные астрономом Кеплером, Ньютон установил свое знаменитое положение о всемирном тяготении.

Всякие два тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной массам тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Возьмем два шара. Пусть масса одного из них m_1 г, второго m_2 г, а расстояние между их центрами r см, тогда сила их взаимного притяжения f выразится формулой:

$$f = K \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Если $m_1 = m_2 = 1$ грамму, а $r = 1$ см, то

$$f = K \frac{1 \cdot 1}{1^2},$$

$$f = K,$$

т. е. коэффициент пропорциональности K , входящий в формулу (1), выражает ту силу, с которой взаимно тяготеют два шарика, обладающие массами по 1 г, причем центры их находятся на расстоянии 1 см. Он носит название — *постоянная тяготения*.

Установлено, что $K = 667 \cdot 10^{-10}$ дин.¹

Пользуясь формулой (1), мы всегда можем вычислить, с какой силой притягиваются друг к другу те или иные тела.

Возвратимся теперь к вопросу о падении тел.

Обозначим массу Земли через M г, массу некоторого тела через m г, а радиус Земли через R см.

Сила, с которой тело притягивается Землею (она называется *весом тела*),

$$f = K \frac{m \cdot M}{R^2}. \quad (2)$$

Если тело удалено на незначительное расстояние от поверхности Земли, то испытываемое им притяжение будет почти такое же, как и у самой поверхности, так как величина R в формуле (2) изменяется ничтожно мало.

Радиус Земли равен $637 \cdot 10^6$ см (6370 км). Пусть мы удалили тело на расстояние даже в 1 км от поверхности Земли. Стоит ли в знаменателе дроби (2) $637 \cdot 10^6$ см, или $637,1 \cdot 10^6$ см, это существенно не отражается на величине дроби. Вот почему мы считаем, что падение тел с незначительной высоты совершается под влиянием постоянной силы и происходит вследствие этого равноускоренно.

Поместим в длинную стеклянную трубку несколько различных предметов: камешек, металлическую гирьку, кусочек бумаги, перышко, пробку и быстро перевернем трубку. Все перечисленные выше предметы начнут падать, причем быстрее всего упадут камень и гирька, затем пробка, бумага же и перышко встретят большее сопротивление воздуха и упадут заметно позднее.

Выкачайте с помощью насоса воздух из трубки и проделайте опыт вторично. Вы заметите, что все предметы упали одинаково быстро. Повторите опыт несколько раз, и вы придете к тому же выводу.

Рис. 40 изображает падение камня и перышка в безвоздушном пространстве. Рис. 41 показывает, как эти тела падают в воздухе — камень заметно опережает перышко.



Рис. 40. Рис. 41.

¹ $K = 0,0000000667$ дин.

Разберем падение камня и перышка в безвоздушном пространстве исходя из закона всемирного тяготения.

Обозначим массу гирьки через m_1 г, массу перышка через m_2 г, массу Земли — M г, ее радиус — R см.

Сила, с которой тяготеет к Земле гирька:

$$f_1 = K \cdot \frac{M \cdot m_1}{R^2} \text{ дин.} \quad (3)$$

Постоянно действующая сила производит равноускоренное движение. Обозначим ускорение, получаемое гирей, через x .

Тогда (стр. 48)

$$f_1 = m_1 x \quad (4)$$

Сравнивая выражение (3) и (4), имеем:

$$m_1 x = K \frac{M m_1}{R^2}$$

Сокращая на m_1 , получим:

$$x = K \frac{M}{R^2} \quad (5)$$

Т. е. ускорение, полученное гирькой, не зависит от ее массы и является величиной постоянной (K , M , R^2 — величины постоянные).

Аналогично, для перышка имеем:

$$f_2 = K \frac{M m_2}{R^2}$$

и

$$f_2 = m_2 y,$$

где y — ускорение, полученное перышком.

$$m_2 y = K \frac{M m_2}{R^2},$$

$$y = K \frac{M}{R^2}, \quad (6)$$

следовательно,

$$x = y.$$

Таким образом мы приходим к выводу, что в случае отсутствия сопротивлений (пустота) все падающие тела имеют одинаковое ускорение.

Ускорение силы тяжести принято обозначать буквой g . Оно в среднем равно 981 см/сек².

Если мы обозначим силу веса тела с массой m через p , то будем иметь для нее следующее выражение:

$$p = mg.$$

Эта формула указывает нам, что *вес тела пропорционален его массе*.

Как мы уже отмечали выше, масса тел измеряется в *граммах массы*, вес — в *граммах веса*. Это часто заставляет смешивать понятие массы и веса, чего, конечно, не следует делать.

Масса тела всюду и всегда неизменна, вес же меняется с изменением ускорения силы тяжести (g).

Если бы тело попало на Луну, то оно сохранило бы свою первоначальную массу, вес же его значительно уменьшился бы, так как масса Луны и ее радиус совершенно иные, чем масса и радиус Земли, а по формуле (5) для ускорения мы получили бы совершенно отличную от g величину.

Почему же о массе тел судят по их весу?

Чтобы сравнить две массы, достаточно сравнить их веса в одной и той же точке поверхности Земли.

Пусть одно тело обладает массой m_1 г и весом p_1 г, а второе соответственно m_2 и p_2 .

Тогда

$$p_1 = m_1 g$$

$$p_2 = m_2 g.$$

Разделив одно выражение на другое, получим:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2} \quad (7)$$

т. е. отношение масс тел равно отношению их весов.

Сила в одну дину сообщает массе в 1 г ускорение всего лишь в одну единицу, тогда как сила веса в 1 г заставляет ее падать в безвоздушном пространстве с ускорением в 981 раз большим, следовательно, сила в 1 г в 981 раз больше силы 1 в дину, т. е. 1 дина = $\frac{1}{981}$ г силы.

На это мы уже указывали выше (стр. 48).

§ 51. Плотность тел. *Плотностью тела называется масса его единицы объема*.

Пусть масса тела m г, а его объем v см³, в таком случае плотность его d :

$$d = \frac{m}{v} \frac{г}{см^3}.$$

Измеряя вес тела в граммах веса, а объем в кубических сантиметрах, мы получаем удельный вес как частное от деления веса тела на его объем.

§ 52. Падение тел. Падение тела с небольшой высоты совершается под действием постоянной силы, равной его весу. Мы отмечали, что постоянная сила в среде без сопротивлений приводит тело в равноускоренное движение. Таким образом, если пренебрегать сопротивле-

нием воздуха, падение тел следует рассматривать как *равноускоренное движение*.

Заменяя в формулах для равноускоренного движения без начальной скорости ускорение s ускорением падающих тел g , имеем:

$$V_t = gt,$$

$$S = \frac{gt^2}{2},$$

$$V_t^2 = 2gS.$$

Примеры. 1. С вершины башни упал камень. Какова высота этой башни, если время падения было равно 3 секундам?

Высота башни H равна расстоянию S , пройденному камнем за 3 секунды; ее можно найти из формулы

$$S = \frac{gt^2}{2},$$

подставляя вместо S высоту башни H , вместо $t = 3$ сек и вместо $g = 9,81$ м/сек²

$$H = \frac{9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot (3 \text{ сек})^2}{2} = \frac{88,29}{2} \text{ м} \approx 44 \text{ м}.$$

2. С дрижабля, находящегося на высоте 490,5 м над поверхностью Земли, выброшен мешок с песком. Сколько времени он будет падать и с какой скоростью упадет на землю?

Из формулы

$$S = \frac{gt^2}{2}$$

находим время падения t :

$$t^2 = \frac{2S}{g} \text{ или } t = \sqrt{\frac{2S}{g}}.$$

Так как $S = 490,5$ м, а $g = 9,81$ м/сек², то

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 490,5}{9,81}} = 10 \text{ сек}.$$

Скорость, с которой упадет мешок, может быть определена по формуле:

$$V_t = gt,$$

подставляя вместо $t = 10$ сек:

$$V_t = 9,81 \text{ м/сек}^2 \cdot 10 \text{ сек} = 98,1 \text{ м/сек}.$$

§ 53. Движение тела, брошенного отвесно вверх. Пусть тело брошено отвесно вверх с некоторой скоростью V_0 . Сила тяжести, непрерывно действуя на тело, сообщит ему ускорение g , направленное в сторону, противоположную скорости V_0 , т. е. заставит его двигаться *равнозамедленно*.

Прежде всего решим вопрос о том, каково время поднятия тела вверх.

Скорость V_t через t секунд будет равна:

$$V_t = V_0 - gt.$$

Тело остановится в тот момент, когда V_t сделается равной нулю
т. е.

$$V_0 - gt_1 = 0,$$

или

$$gt_1 = V_0,$$

откуда время полета тела вверх t_1 ,

$$t_1 = \frac{V_0}{g}.$$

Высота поднятия тела H за t_1 секунд может быть найдена из формулы:

$$S = V_0 t_1 - g \frac{t_1^2}{2},$$

заменяя S через H и t_1 через $\frac{V_0}{g}$:

$$H = V_0 \frac{V_0}{g} - g \frac{\left(\frac{V_0}{g}\right)^2}{2},$$

или

$$H = \frac{V_0^2}{g} - \frac{V_0^2}{2g},$$

откуда

$$H = \frac{V_0^2}{2g}.$$

Найдем теперь время падения тела вниз. Падение будет совершаться равноускоренно без начальной скорости, т. е. пройденный путь S за t секунд будет равен

$$S = \frac{gt^2}{2}.$$

Но пройденный путь при падении тела также составит H , т. е.

$$H = \frac{gt_2^2}{2},$$

где t_2 — время падения.

Подставляя вместо $H = \frac{V_0^2}{2g}$, имеем:

$$\frac{V_0^2}{2g} = \frac{gt_2^2}{2},$$

откуда

$$t_2^2 = \frac{V_0^2}{g^2} \text{ или } t_2 = \frac{V_0}{g},$$

т. е.

$$t_2 = t_1.$$

Время падения тела равно времени его поднятия.

Найдем ту приобретенную скорость V_1 , с которой тело упадет назад. Она может быть найдена из формулы:

$$V_1^2 = 2gS.$$

Подставляя вместо $S = H = \frac{V_0^2}{2g}$, имеем:

$$V_1^2 = 2g \frac{V_0^2}{2g},$$

т. е.

$$V_1^2 = V_0^2, \text{ или } V_1 = V_0,$$

скорость, с которой тело падает назад, равна той скорости с которой тело было брошено вверх.

§ 54. Вопросы и задачи. 39. Отходя от станции, поезд движется некоторое время равноускоренно. Каково ускорение, если через 20 секунд после начала движения он имеет скорость 400 см/сек?

40. Отходя от станции, паровоз некоторое время движется равноускоренно. Сколько времени он находится в движении, если он приобрел скорость 36 км/час, двигаясь с ускорением 25 см/сек²?

41. Какое расстояние пройдет паровоз предыдущей задачи за 1 мин 20 сек?

42. Подходя к пристани, пароход, имевший скорость 9 м/сек, движется равномерно замедленно и останавливается через 30 секунд. Определите величины отрицательного ускорения и пространства, пройденного пароходом до момента остановки.

43. Тело, движущееся равноускоренно с начальной скоростью, прошло за 5 секунд своего движения 40 см, а за 10 секунд 130 см. Найти ускорение и начальную скорость.

44. Какой путь проходит тело, движущееся равноускоренно с начальной скоростью V_0 и ускорением s , за n -ую секунду своего движения?

45. Какой путь проходит тело, движущееся равноускоренно с начальной скоростью $V_0 = 10$ см/сек и ускорением $s = 5$ см/сек², за 6-ую секунду своего движения?

46. Сколько времени будет падать тело с крыши небоскреба «Метрополитен Бильдинг», высота которого 213 м?

47. Какой путь проходит свободно падающее тело за n -ую секунду?

48. С вершины горы отвесно вниз падает камень. Через две секунды за ним падает второй камень. На каком расстоянии будут эти камни через 3 сек после начала движения второго камня?

49. С какой скоростью нужно бросить отвесно вверх тело, чтобы оно достигло высоты 100 м?

50. Какой высоты достигает пуля, вылетевшая отвесно вверх с начальной скоростью 98,1 м/сек?

51. Одновременно брошены два тела: одно с поверхности Земли снизу вверх с начальной быстротой 40 м/сек, другое свободно падает вниз с высоты 100 м. Через сколько секунд и на каком расстоянии от поверхности Земли эти тела встретятся?

52. С какой скоростью вылетела отвесно вверх пуля, если она вернулась назад через 12 секунд после вылета из дула?

53. Тело массой 5 кг движется прямолинейно и равноускоренно с ускорением 20 см/сек^2 . Какова действующая на тело сила?

54. Какую постоянную силу должен развивать двигатель автомобиля весом 1000 кг, если через 10 сек после начала движения скорость автомобиля достигает 27 км/час ?

55. Найдите силу, с которой притягивается Земля к Солнцу. Масса Земли около $600 \cdot 10^{18} \text{ т}$, масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли. Среднее расстояние Земли от Солнца около $150 \cdot 10^6 \text{ км}$.

56. Определите ускорение силы тяжести на Луне, если диаметр Луны составляет 0,27 земного диаметра, а ее масса равна 0,012 массы Земли.

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ И РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ.

§ 55. Центр тяжести и определение его положения в теле опытным путем. На каждую частицу любого физического тела действует сила тяжести и тянет ее к центру Земли, т. е. в отвесном направлении.

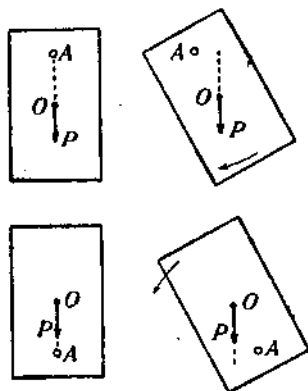


Рис. 42.

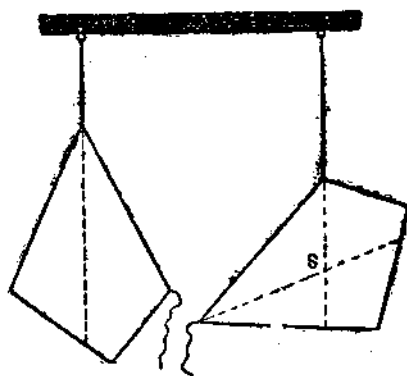


Рис. 43.

нии. Равнодействующая всех этих сил носит название *веса тела*, а точка ее приложения именуется *центром тяжести тела*.

Возьмите какое-нибудь тело, подвесьте его или подоприте так, как показано на рис. 42 (центр тяжести обозначен буквой O), и выведите из положения равновесия. Сила веса даст некоторый момент и повернет тело в направлении, указанном стрелкой. Если центр тяжести тела выше точки опоры, то тело опрокинется, если же центр тяжести ниже точки опоры, тело возвратится в первоначальное положение.

Момент силы веса обратится в нуль только тогда, когда центр тяжести будет находиться на одной отвесной прямой с точкой опоры (плечо равно нулю), что и будет соответствовать равновесию тела.

Пользуясь этим правилом, мы всегда можем найти центр тяжести любого тела даже самой неправильной формы. Подвесив или подпирая тело в какой-нибудь точке, найдем положение равновесия и проведем вертикальную прямую, проходящую через точку опоры, — центр тяжести непременно должен находиться на этой прямой. Повто-

ряя тот же опыт, изменив местоположение точки опоры, находим вторую прямую, на которой также должен находиться центр тяжести. Пересечение этих двух прямых и даст положение центра тяжести S (рис. 43).

§ 56. Нахождение центра тяжести тела по центрам тяжести его частей. Если тело правильной геометрической формы во всей своей массе однородно, т. е. состоит из вещества, имеющего по всему объему одинаковый удельный вес, то нахождение центра тяжести легко сделать на основании данных геометрии.

Приводим данные о положении центра тяжести некоторых тел.

Тело	Положение центра тяжести
Прямоугольная пластинка одинаковой толщины.	На пересечении диагоналей.
Шар.	В центре шара.
Прямой цилиндр или правильная призма.	На середине высоты.
Правильная пирамида или конус.	На высоте на расстоянии $\frac{1}{4}$ ее от основания.

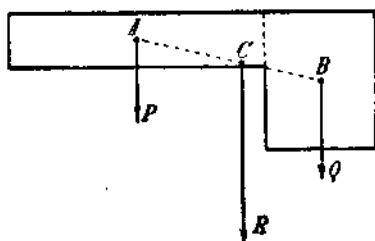


Рис. 44.

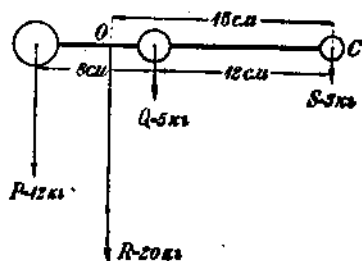


Рис. 45.

Если разделить данное тело на отдельные части правильной геометрической формы, то можно найти центр тяжести всего тела как точку приложения равнодействующей сил веса отдельных частей тела.

На рис. 44 изображено тело, центр тяжести которого нужно найти. Разделяем его площадь на два прямоугольника, вес которых показан силами P и Q . Точка (C) приложения равнодействующей этих сил (R) является центром тяжести всей площади.

На рис. 45 изображено тело, состоящее из трех шаров, центры которых лежат на одной прямой. Требуется найти их общий центр тяжести. Пусть вес первого шара 12 кг, второго 5 кг, а третьего 3 кг. Искомый центр тяжести будет совпадать с точкой приложения равнодействующей трех параллельных сил 12 кг, 5 кг и 3 кг.

Находим сумму моментов этих сил относительно какой-нибудь произвольной точки (например точки C , взятой на силе S).

Момент силы P	$12 \times 20 = - 280$	кг-см
» » Q	$5 \times 12 = - 60$	»
» » S	0	»

Сумма моментов — 300 кг-см

Момент равнодействующей также должен равняться — 300 кг-см.

Следовательно, точка приложения равнодействующей (O) находится влево от точки C , на расстоянии

$$\frac{300}{20} = 15 \text{ см.}$$

Таким образом, точка O и будет являться центром тяжести всего тела.

§ 57. Равенство действия и противодействия. Прежде чем перейти к рассмотрению вопроса о равновесии тел, нам нужно познакомиться с законом о взаимодействии тел друг на друга.

Вы стоите на полу. Сила вашего веса производит давление, так как однако движения при этом не происходит, то очевидно, что со стороны пола ваши ноги испытывают равное и прямопротивоположное противодействие, уравновешивающее силу веса.

Вы растягиваете резину — растянутая резина с такой же силой действует на вашу руку.

Быстро мчавшийся поезд налетел на другой поезд, неподвижно стоявший на запасном пути. От полученного толчка пострадает не только состав второго поезда, но также и первого, так как сила удара быстро ехавшего поезда вызовет со стороны неподвижного равное противодействие.

Взаимодействия двух тел друг на друга равны между собою и направлены в противоположные стороны — такими словами формулировал Ньютон один из основных законов механики (третий закон Ньютона).

Содержание его можно кратко передать следующими словами: *Действие всегда равно и прямопротивоположно противодействию*.

Действие пружинных весов также основано на этом законе. Сила веса тела растягивает пружину, которая стремится вследствие своей упругости вернуться в первоначальное состояние и тянет тело вверх с силой равной и прямопротивоположной.

Пусть некоторое тело массой m приподнято над поверхностью Земли. Это тело притягивается Землею с силой

$$f = K \frac{m \cdot M}{R^2},$$

где M — масса Земли, R — радиус Земли, K — постоянная тяготения ($667 \cdot 10^{-10}$ дин).

Но если тело притягивается Землею с силой f , то на основании только-что разобранных нами третьего закона Ньютона и Земля притягивается телом с равной и прямопротивоположной силой f .

Однако эти равные силы f действуют на различные массы, а следовательно они вызывают и различные ускорения.

Назовем ускорение, полученное телом, g , а ускорение, полученное Землею, a . В таком случае:

$$f = mg$$

и

$$f = Ma,$$

откуда

$$mg = Ma,$$

или

$$\frac{a}{g} = \frac{m}{M},$$

т. е. ускорение, полученное Землею, во столько же раз меньше ускорения, полученного телом, во сколько раз масса тела меньше массы Земли. Так как масса тела в колоссальное число раз меньше массы Земли, то и ускорение a неизмеримо меньше ускорения g .

§ 58. Равновесие тел, подпертых в одной точке. На стр. 55 мы уже говорили о равновесии тел. Пусть некоторое тело, например

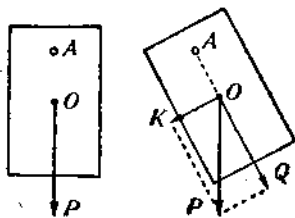


Рис. 46.

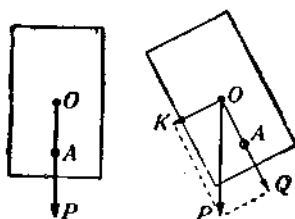


Рис. 47.

доска, подперто таким образом, что точка его опоры A выше центра тяжести O (рис. 46). Равновесие будет сохранено лишь в том случае, когда сила веса пройдет через точку опоры. Выведем теперь тело из положения равновесия. Силу веса P можно разложить по правилу параллелограмма на две составляющие — силу Q , направленную по прямой OA , и силу K — ей перпендикулярную. Сила Q вызовет в точке опоры равное и прямопротивоположное противодействие (реакцию), которое уничтожает силу Q , сила K вернет тело в первоначальное положение. Этот случай носит название *устойчивого равновесия*.

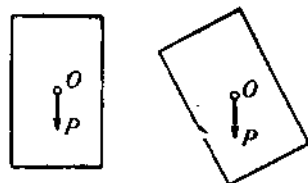


Рис. 48.

Пусть точка опоры A ниже центра тяжести O (рис. 47). Разложим силу веса P на две составляющие Q и K , как показано на чертеже. Сила Q уничтожится сопротивлением опоры, сила K станет поворачивать тело в своем направлении и заставит его опрокинуться. В данном случае мы имеем *неустойчивое равновесие*.

Если точка тела совпадает с центром тяжести, то при любом повороте тела сила веса P (рис. 48) станет уничтожаться сопротивлением опоры, и тело будет оставаться в новом положении без изменения. Этот случай равновесия носит название *безразличного*.

§ 59. Равновесие тела, имеющего опорную поверхность. Возьмем теперь тело, которое опирается на плоскую поверхность, как например человек, стол или стул на полу, различные предметы на столе и т. д. На рис. 49 (верх) изображены два тела, имеющие одинаковую ширину основания, но центр тяжести одного из них ниже, чем у другого.

Отклоним левое тело на некоторый угол (рис. 49-а) и разложим силу веса P на две, воспользовавшись известным нам правилом параллелограмма сил; направление одной из них Q возьмем вдоль прямой OA , соединяющей центр тяжести с точкой опоры, направление второй силы K — ей перпендикулярное. Первая сила уничтожится со-

противлением опоры, а вторая возвратит тело в прежнее положение. При некотором угле отклонения (рис. 49-б) сила веса как раз прой-

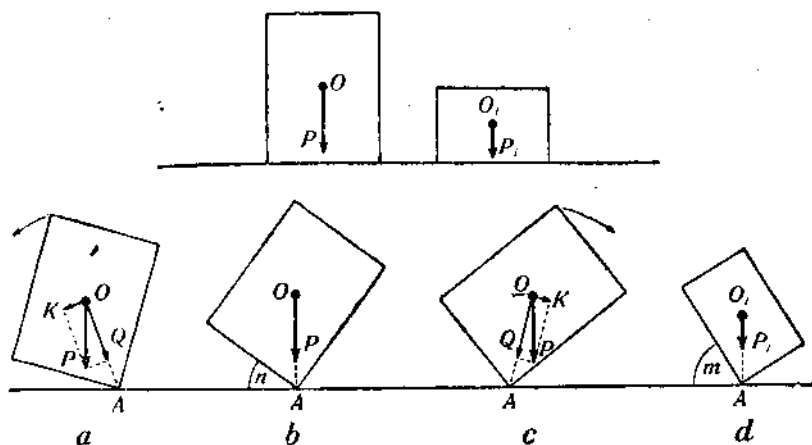


Рис. 49.

дет через крайнюю точку опоры, и тело будет в равновесии. Но достаточно отклониться ему в ту или иную сторону, и тело или возвратится в первоначальное положение, или опрокинется. Угол n , соответствующий этому случаю, носят название *предельного угла устойчивости тел*. При отклонении тела на угол больше предельного оно уже опрокидывается, что легко видеть на рис. 49-с.

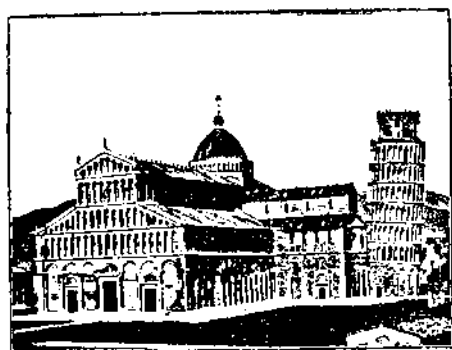


Рис. 50.

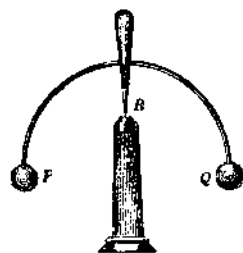


Рис. 51.

Чем ниже центр тяжести и чем шире основание, тем, конечно, больше предельный угол устойчивости, а следовательно, тем больше устойчивость тела.

Предельный угол устойчивости m для правого тела, изображенного на рис. 49 (верх), как легко видеть, больше предельного угла n для левого тела.

§ 60. Вопросы и задачи. 57. Определите положение центра тяжести невесомого стержня длиной 100 см, если на концах его подвешены грузы 2 кг и 3 кг.

58. Найдите положение центра тяжести стержня предыдущей задачи с двумя грузами на концах, предполагая, что стержень однороден и каждый погонный сантиметр его весит 50 г.

59. Приведите примеры тел, подпертых в одной точке, находящихся в комнате в устойчивом равновесии.
60. Почему у настольных ламп основание делается возможно более массивным?
61. На горизонтальной плоскости стоит однородный сплошной цилиндр и конус из одинакового материала. Их вес и площади основания равны. Которое из этих двух тел устойчивее?
62. Почему, идя в гору, человек наклоняется вперед?
63. Почему воз, нагруженный высоко, опрокинется при меньшем уклоне, чем воз, нагруженный низко?
64. Почему, когда птица улетает с ветки, ветка отклоняется назад?
65. Объясните устройство игрушки «ванька-встанька».
66. В Италии в городе Пизе находится знаменитая «падающая башня». Она изображена на правой части рисунка 50. Объясните, почему эта башня не опрокидывается?
67. Почему стержень с двумя грузами P и Q , подпертый в точке R (рис. 51), находится в равновесии?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ ДЕЙСТВИЯ СИЛ.

§ 61. Закон независимости действия сил. Движение, совершаемое телом, зависит только от массы самого тела и величины силы, действующей на него, при этом совершенно безразлично, находится ли это тело еще в каком-либо другом движении, или совершает только одно движение, вызванное данной силой.

Это положение было отмечено Ньютоном и носит название закона независимости действия сил. Его можно формулировать такими словами. Если на тело действуют одновременно несколько сил, то каждая из этих сил производит свое действие независимо от других, так, как будто бы она приложена к телу только одна.

§ 62. Сложение движений. Предположим, что пароход (рис. 52) в течение некоторого времени движется прямолинейно и перешел из положения A в положение B , т. е. прошел путь, изображенный прямолинейным отрезком NN_1 . За это время один из пассажиров перешел из точки N в точку M , двигаясь в том же направлении, что и пароход, т. е. прошел путь, изображенный на рисунке отрезком N_1M . Это движение пассажир совершает независимо от движения парохода, т. е. он перемещается на расстояние N_1M совершенно одинаково, находится ли пароход в покое или движении.

В результате этих двух движений и парохода и пассажира одновременно как изменилось положение пассажира относительно берегов? Он переместился на расстояние, равное $NN_1 + N_1M$, и два указанных движения можно было бы заменить одним движением по линии NM .

Какое одно движение смогло бы заменить передвижение и парохода и пассажира, если бы оба они двигались по одной прямой линии, но в противоположные стороны, т. е. если бы пароход прошел путь NN_1 , а пассажир за это время передвинулся в обратном направлении на расстояние N_1K ?

Не трудно прийти к выводу, что эти два движения можно заменить одним, равным $NN_1 - N_1K = NK$, т. е. разности расстояний, пройденных пароходом и пассажиром.

Предположим теперь, что направление движения парохода и пассажира составляют между собой некоторый угол. Пусть пароход прошел путь CD , а пассажир за это время перешел из точки C в точку E .

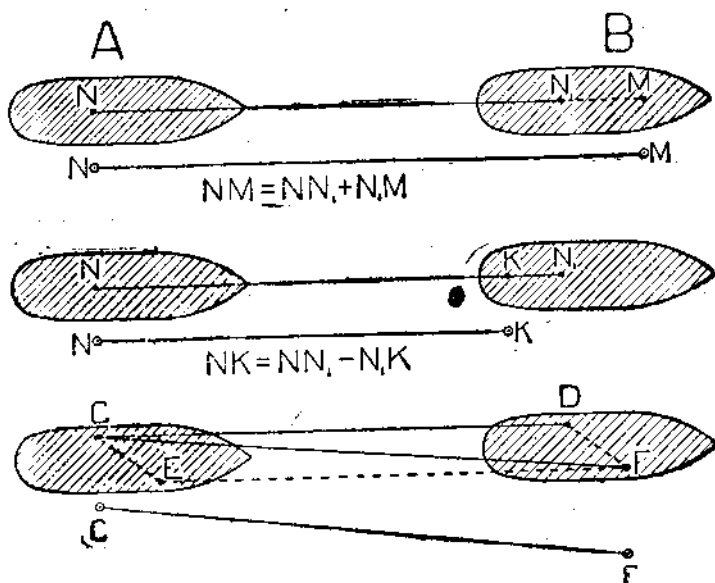


Рис. 52.

В результате этих двух движений пассажир очутится в точке F , т. е. переместится относительно берега на расстояние CF , равное диагонали параллелограмма, построенного на указанных двух движениях.

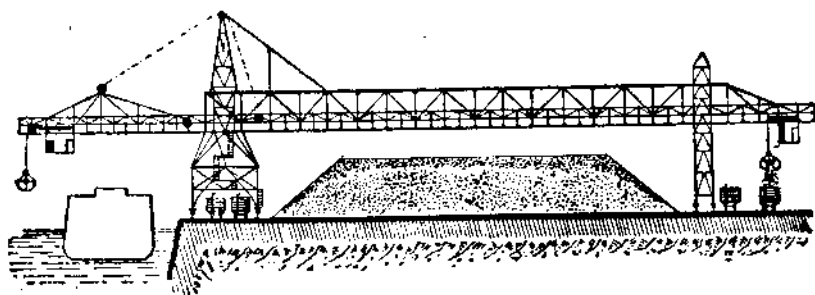


Рис. 53.

Таким же способом возможно заменить одно движение двумя или несколькими, дающими вместе одинаковый результат, что и заданное движение.

Пример сложного движения. На рис. 53 изображен мостовой кран, предназначенный для разгрузки и погрузки каменного угля на суда. Он представляет

собой мостовую ферму, могущую передвигаться на колесах по рельсам, проложенным вдоль набережной. Вдоль фермы от одного конца крана к другому скользят ковш, захватывающий уголь, который, кроме того, может с помощью лебедки подниматься и опускаться.

Движение крана является примером сложного движения — он одновременно 1) поднимается лебедкой вверх или опускается вниз, 2) передвигается вдоль фермы и 3) вместе с фермой движется вдоль набережной. Все эти три движения можно было бы заменить одним.

§ 63. Сложение двух равномерных и прямолинейных движений. Рассмотрим случай, когда оба движения, совершаемые телом,

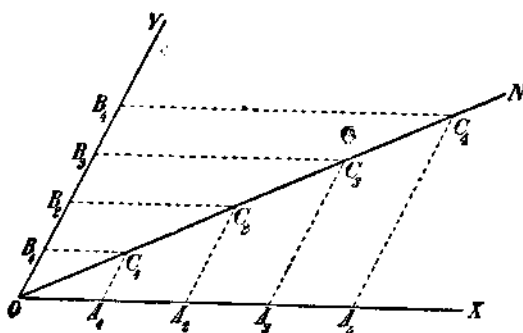


Рис. 54.

равномерны и прямолинейны. Пусть в направлении OX тело движется со скоростью v_1 , а в направлении OY со скоростью v_2 (см. рис. 54). Отложим по оси OX расстояние, равное v_1 , а по оси OY расстояние v_2 . При одновременном движении в обоих указанных направлениях тело будет через 1 секунду в точке C_1 , представляющей вершину параллелограмма, построенного на скоростях v_1 и v_2 .

Аналогично, откладывая по соответствующим направлениям отрезки $2v_1$ и $2v_2$, $3v_1$ и $3v_2$ и т. д., получим ряд точек C_2 , C_3 и т. д., представляющих собою последовательные положения тела через 2 секунды, 3 секунды и т. д.

Из подобия треугольников OA_1C_1 , OA_2C_2 , OA_3C_3 и т. д. легко заключить, что линия ON представляет собою прямую, т. е. два равномерных и прямолинейных движения могут быть заменены одним движением, также равномерным и прямолинейным.

В нашем примере отрезок OC_1 будет представлять собою скорость этого результирующего движения, т. е. скорость может быть так же найдена, как диагональ параллелограмма, построенного на скоростях составляющих движений.

§ 64. Полет тела, брошенного горизонтально. Пусть из точки A с высоты H (рис. 55) брошено горизонтально тело со скоростью v_0 . Это тело будет одновременно совершать два движения: 1) равномерное движение по инерции со скоростью v_0 в горизонтальном направлении и 2) под действием силы тяжести равноускоренное движение отвесно вниз.

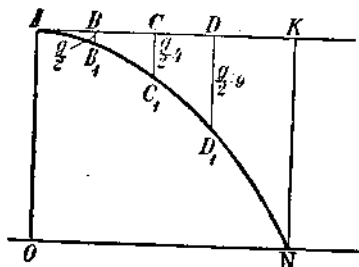


Рис. 55.

Через одну секунду тело переместится в горизонтальном направлении на расстояние v_0 . Под действием силы тяжести за это же время оно сместится на $\frac{g \cdot 1^2}{2} \cong 4,9$ м и очутится в точке B_1 .

Через 2 секунды тело в горизонтальном направлении переместится от точки A на расстояние $AC = 2v_0$, под действием же силы тяжести оно опустится вниз на $\frac{g \cdot 2^2}{2} \cong 19,6$ м и очутится в точке C_1 и т. д.

Когда упадет тело на землю? Очевидно, тогда, когда пройденный путь под действием силы тяжести

$$S = \frac{gt^2}{2}$$

будет равен H , т. е.

$$\frac{gt^2}{2} = H,$$

откуда

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Какова дальность полета L ? В горизонтальном направлении тело переместится за t секунд на расстояние $AK = ON = v_0 t$, т. е.

$$L = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Аналогично можно разобрать случай, когда тело брошено под углом к горизонту.

Траектория движения тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, представляет кривую, называемую *параболой*.

При наших расчетах мы не принимали во внимание сопротивления воздуха. При большой скорости движения (например, снаряда, вылетевшего из дула орудия) сопротивление воздуха делается весьма значительным, и траектория полета заметно отличается от найденной нами.

§ 65. Относительность движения. Наблюдаемые нами движения кажутся нам совершенно различными в зависимости от того, в каком движении мы участвуем сами.

Находясь на палубе парохода, вы бросили отвесно вверх камень. Он поднялся на некоторую высоту и упал к вашим ногам. Какова траектория камня? Камень двигался по прямой линии — ответите вы на этот вопрос.

Наблюдатель, находящийся на берегу, сказал бы, однако, что камень двигался по кривой. Действительно, камень участвовал в двух движениях: вертикальном относительно парохода и горизонтальном вместе с пароходом, т. е. двигался относительно Земли по некоторой кривой. Между тем вы сами также двигались вместе с пароходом и второе движение для вас было незаметным.

§ 66. Вопросы и задачи. 68. Гребец двигает лодку поперек реки со скоростью 1,5 м/сек. Скорость течения 0,5 м/сек. С какой скоростью лодка пересекает реку?

69. Ширина реки 90 м. На сколько метров в сторону от точки, противоположной точке отхода, будет снесена течением лодка задачи 68?

70. Какую траекторию будет иметь струя, вытекающая через отверстие в боковой стенке сосуда?

71. С высоты башни высотой 100 м брошен горизонтально камень с начальной скоростью $v_0 = 10$ м/сек. Как долго он будет падать? На каком расстоянии от основания башни упадет он?

72. С какой начальной скоростью нужно бросить горизонтально с крыши дома тело, чтобы оно, упав на поверхность Земли, удалилось в горизонтальном направлении от места, откуда оно было брошено, на 12 м? Высота здания 44,1 м.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.

§ 67. Угловая скорость. В технике очень часто приходится иметь дело с вращательным движением. Вспомните вращение колес различных повозок или вращение валов машин.

Чтобы охарактеризовать быстроту вращения какого-нибудь вала или колеса, неудобно пользоваться линейными скоростями, так как различные точки вращающегося тела проходят в единицу времени различные пути.

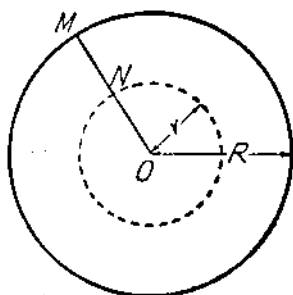


Рис. 56.

Пусть, например, колесо A (см. рис. 56) совершает один полный оборот в секунду, за это время точка N описывает окружность небольшого радиуса r , точка M проходит сравнительно большой путь, равный длине окружности радиуса R , и т. д., т. е., чем дальше точка отстоит от оси вращения, тем больше ее линейная скорость.

Нет ли, однако, чего-либо общего для всех точек вращающегося тела?

Есть. Это угол, на который повертываются они за некоторый промежуток времени.

Чем же мы будем характеризовать быстроту вращения?

Угловой скоростью, т. е. величиной угла, на который поворачиваются все точки вращающегося тела за единицу времени.

Если говорят, что данное колесо имеет угловую скорость в два раза большую, чем другое, то это значит, что оно за один и тот же промежуток времени поворачивается на угол в два раза больший, чем первое.

Пусть угловая скорость данного вращающегося тела ω . Будем выражать ее в радианах, т. е. в виде отношения длины дуги, которую описала какая-нибудь точка тела за одну секунду, к ее расстоянию до центра вращения (r).

Но путь, пройденный какой-либо точкой вращающегося тела за 1 секунду, есть *линейная скорость вращения* (v). Таким образом

$$\omega = \frac{v}{r},$$

или

$$v = \omega \cdot r,$$

т. е. линейная скорость какой-нибудь точки тела, отстоящей на расстоянии r от оси вращения, равна угловой скорости, умноженной на r .

Пусть вращающееся тело совершает один полный оборот в T секунд, т. е. за T секунд оно поворачивается на угол 2π . В таком случае за одну секунду тело повернется на угол $\frac{2\pi}{T}$, а угол, на который поворачивается тело в течение одной секунды, носит название угловой скорости. Следовательно,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

В технике угловую скорость часто характеризуют числом полных оборотов, совершаемых данным валом или колесом за некоторый промежуток времени (обычно за 1 секунду). Так, говорят, что паровая машина дает валу 5 оборотов в секунду, колесо водяной турбины вращается со скоростью 600 оборотов в минуту и т. д.

Пусть тело совершает в 1 секунду n полных оборотов. Очевидно, время совершения одного оборота составит

$$T = \frac{1}{n} \text{ секунды.}$$

Угловая скорость в таком случае может быть выражена формулой:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

§ 68. Центробежная сила. Может быть, вы обращали внимание на движение трамвая и поезда на закругленных путях. При значительной быстроте движения и крутом повороте пассажиры, стремясь продолжать вследствие инерции свое прямолинейное движение, отбрасываются по касательной к закруглению.

Что же заставляет поезд изменить свое прямолинейное движение? Давлению, которое испытывают его колеса со стороны рельсов в искривленной части пути.

Сила, заставляющая прямолинейно движущееся тело перемещаться по окружности и направленная внутрь закругления, носит название *центробежной*.

Камень, привязанный к веревке (рис. 57), при его вращении не удаляется от центра вращения только потому, что его удерживает веревка. Сила, с которой камень притягивается посредством веревки к центру вращения, будет являться центробежной.

Найдем величину центробежной силы для случая равномерного движения тела по окружности круга со скоростью v .



Рис. 57.

Пусть тело массой m равномерно движется по окружности круга и находится в данный момент в точке A (рис. 58). Если бы на тело перестала действовать центростремительная сила (например, оборвалась веревка, к которой привязан камень, оно начало бы двигаться по инерции по касательной AC и через некоторый промежуток времени t очутилось бы в точке C . В действительности же тело приходит в точку D , проходя путь vt по дуге AD .

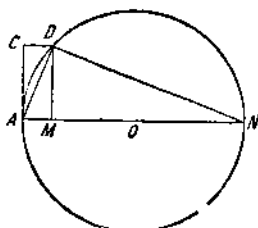


Рис. 58.

Таким образом, за t секунд тело смещается под влиянием центростремительной силы на расстояние CD . Если из точки D провести линию, параллельную AC , то отрезок AM будет равен CD .

Для весьма малого промежутка времени t центростремительную силу f , вызвавшую смещение тела на расстояние AM , можно считать постоянной. В таком случае она сообщает телу ускорение

$$c = \frac{f}{m}.$$

Расстояние AM есть путь, пройденный телом за время t под влиянием постоянной силы f ; он равен $\frac{ct^2}{2}$ или, подставляя вместо $c = \frac{f}{m}$, имеем,

$$AM = \frac{ft^2}{2m}.$$

Для малого промежутка времени дугу AD можно заменить хордой AD . Но хорда AD есть средняя пропорциональная между всем диаметром AN и прилежащим отрезком AM :

$$\frac{AN}{AD} = \frac{AD}{AM},$$

или

$$AD^2 = AN \cdot AM$$

$$(vt)^2 = 2r \cdot \frac{ft^2}{2m},$$

откуда

$$f = \frac{mv^2}{r}.$$

Центростремительная сила прямо пропорциональна массе тела и квадрату его линейной скорости и обратно пропорциональна радиусу той окружности, по которой происходит вращение.

§ 69. Центробежная сила. На основании закона равенства действия и противодействия можно заключить, что камень, вращающийся по окружности круга, испытывающий действию центростремительной силы, в свою очередь вызывает возникновение равной и прямопротивоположной силы. Ее называют *центробежной*.

Веревка не позволяет камню удалиться от центра вращения, камень же с равной и прямопротивоположной силой натягивает веревку. Следует иметь в виду, что центробежная сила приложена к камню, центробежная же к веревке.

При увеличении скорости вращения возрастает как центробежная, так и центробежная сила. Наконец, веревка под действием центробежной силы может разорваться, и тогда камень начинает двигаться по инерции по касательной к окружности, по которой происходило вращение.

Колеса поезда, испытывая со стороны рельсов давление, оказывают в свою очередь равное и прямопротивоположное противодействие, т. е. давят на рельсы с равной силой, направленной в обратную сторону. Итак, сила давления рельсов на колеса является центробежной (она приложена к колесам). Давление же колес на рельсы (приложено к рельсам) является центробежной силой.

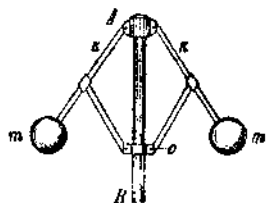


Рис. 59.

§ 70. Центробежный регулятор. На рис. 59 изображен центробежный регулятор, предназначенный для автоматического регулирования равномерного хода паровых машин. Он представляет собой два массивных шара m , висящих на стержнях kk и прикрепленных к вертикальной оси AB с помощью колец. Ось регулятора соединена временной передачей с валом, приводящим в движение машину. При возрастании быстроты вращения шары, вследствие увеличения центробежной силы, стремятся разойтись; при этом они отбрасываются вверх, и вместе с ними поднимаются стержни kk и соединен с ними кольцо c . Это кольцо, поднимаясь вверх, посредством системы рычагов закрывает клапан в трубе, по которой пар из парового котла поступает в машину, машина начинает работать медленнее, и шарики регулятора вновь опадают. Регулятор изготавливается таким образом, чтобы замедлять быстроту движения машины, если она превосходит допустимый предел.

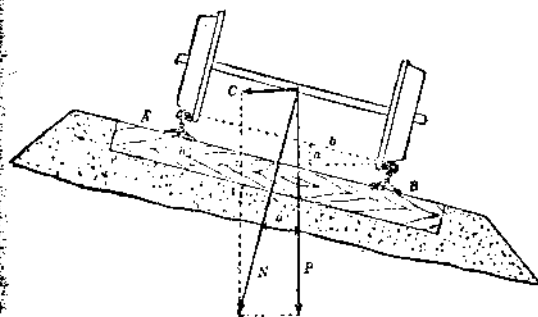


Рис. 60.

§ 71. Движение поезда по закруглению. При движении поезда по закруглению возникает центробежная сила, которая заставляет борды наружных колес производить горизонтальное давление на наружный рельс A (рис. 60). При этом возникает значительное трение,

замодяющее движение поезда, и происходит быстрое изнашивание рельсов и колес. Чтобы избежать этого, наружный рельс на закруглении приподнимают на такую высоту, при которой равнодействующая A центробежной силы f (на рис. 60 центробежная сила f обозначена буквою C) и веса вагона P производит давление, перпендикулярное плоскости пути.

Обозначим высоту поднятия наружного рельса через h (рис. 60). В таком случае.

$$h = b \cdot \sin \alpha,$$

где b — ширина пути, а α — угол наклона плоскости пути с горизонтом.

В виду малости угла α , $\sin \alpha$ можно приближенно считать равным $\operatorname{tg} \alpha$.

Угол между направлениями сил P и N , как угол, составленный перпендикулярными сторонами, равен углу α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{P}.$$

Заменив центробежную силу

$$f = \frac{mv^2}{r},$$

а вес вагона

$$P = mg,$$

имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mv^2}{r \cdot mg} = \frac{r^2}{rg} = \frac{h}{b},$$

откуда

$$h = \frac{bv^2}{rg}.$$

Пример: Какова должна быть высота h поднятия наружного рельса при ширине пути $b = 1,5$ м и радиусе закругления $r = 750$ м для скорости движения $v = 36$ км/час $= 10$ м/сек?

Подставляем в формулу для h вместо b , r , v и g их значения:

$$h = \frac{1,5 \cdot 10^2}{750 \cdot 9,81} \cong 0,02 \text{ м} \cong 2 \text{ см.}$$

§ 72. Сепараторы. На существовании центробежной силы основано устройство *сепараторов* — приборов для отделения сливок от молока, воска от меда и т. д. Помещая эти продукты в быстро вращающийся цилиндр, мы заметим, что частицы большей плотности будут отброшены далее от оси вращения (величина центробежной силы для них больше) и займут ближайшую к поверхности цилиндра часть, тогда как более легкие частицы расположатся ближе к оси вращения.

В лабораториях пользуются приборами подобного же устройства для разделения жидкостей различных плотностей. Эти приборы именуются *центрифугами*.

На рис. 61 изображена центробежная машина — прибор с помощью которого можно произвести ряд опытов разъясняющих действие центро-

божной силы. При вращении колеса R стержень S приходит в быстрое вращение. Если надеть на стержень сосуд с жидкостями разного удельного веса, например, маслом, водою и ртутью, и привести стержень в быстрое вращение, жидкости отделятся друг от друга (см. рис. 62) — дальше всего от оси вращения будут отброшены обладающие наибольшей массой частицы ртути, за ними расположится вода и, на-

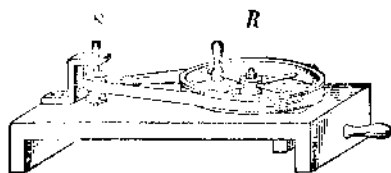


Рис. 61



Рис. 62.

конец, у самой оси вращения будет находиться масло. Этот опыт наглядно показывает принцип действия центрофуг и сепараторов.

§ 73. Влияние вращения Земли на вес тел. При суточном вращении Земли вокруг своей оси все точки ее поверхности испытывают действие центробежной силы. Наиболее быстрым движением обладают точки экватора (за сутки они проходят наибольший путь, равный длине окружности экватора), по мере приближения к полюсам скорость движения уменьшается, на полюсе она равна нулю.

Так как величина центробежной силы возрастает пропорционально квадрату скорости вращения, то, очевидно, она тем больше, чем ближе точки поверхности Земли к экватору. Правда, при приближении к полюсу уменьшается и радиус окружности, по которой происходит вращение, что вызывает увеличение центробежной силы, но последняя возрастает вследствие этого лишь пропорционально *первой степени* радиуса, тогда как скорость вращения входит в формулу центробежной силы во *второй степени*, и ее влияние, конечно, преобладает.

Благодаря влиянию центробежной силы, земной шар не вполне сферичен, он несколько сжат у полюсов, вследствие чего точки экватора дальше отстоят от центра Земли, чем точки полюса, что также влияет на уменьшение силы тяжести у экватора.

В результате действия всех указанных причин ускорение силы тяжести на экваторе равно 978 см/сек^2 , у полюса же (где отсутствует центробежная сила и меньше всего расстояние до центра Земли) $g = 983 \text{ см/сек}^2$. Приведенное на стр. 50 значение $g = 981 \text{ см/сек}^2$ дано для 60-й параллели.

Указанная нами не вполне сферическая форма Земли, как было сказано выше, является результатом действия центробежной силы. Когда земной шар был в жидком состоянии, центробежная сила придавала ему (сильнее действуя на точки экватора, чем точки полюса) указанную эллипсоидальную форму.

С помощью центробежной машины легко доказать, что вращение Земли должно было привести к ее сжатию. Если изготовить шар из отдельных обручей расположенных по меридианам, как это показано на рис. 63, и надеть его на стержень S центробежной машины, то при быстром вращении шар сплющится и примет такую же форму, какую имеет Земля и планеты. Чем быстрее будем вращать шар, тем заметнее будет изменение его формы.

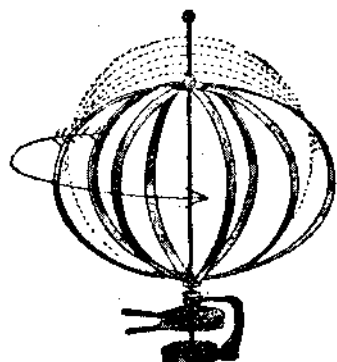


Рис. 63.

§ 74. Вопросы и задачи: 73. Почему при быстром вращении происходит разрыв тяжелых маховиков и точильных камней?

74. Почему при быстрой езде по кругу велосипедист должен наклоняться к центру круга?

75. Как велика линейная скорость движения точки на окружности колеса, диаметр которого $1,5$ м, если оно делает 60 оборотов в минуту?

76. Сколько оборотов делает в минуту шкив диаметром 80 см при скорости движения ремня 6 м/сек?

77. Определить линейную скорость на окружности, продолжительность одного оборота и угловую скорость турбины, имеющей $0,6$ м в диаметре и делающей 300 оборотов в минуту.

78. Какой диаметр следует придать шкиву, если угловая скорость его должна равняться 10 , а линейная скорость по окружности 4 м/сек?

79. Определить угловую скорость 1) секундной стрелки часов, 2) то же для минутной стрелки, 3) то же для часовой стрелки.

80. Колесо паровой турбины с радиусом $0,8$ м делает 1500 оборотов в минуту. Определить линейную скорость на обходе колеса.

81. Определить центробежную силу при вращении колеса турбины предыдущей задачи, отрывающую лопатку весом 100 г.

82. Найти центробежную силу тела весом 10 кг, описывающего окружность радиуса 4 м в течение 8 сек.

83. Почему при прохождении поезда по мосту машинист уменьшает скорость движения?

84. На какую высоту следует поднять наружный рельс на кривой $r=600$ м при ширине пути $b=1,5$ м для средней скорости движения поездов $v=36$ км/час?

85. Каково натяжение каната гигантских шагов, если он образует угол 30° со столбом, а вес человека равен 64 кг?

86. С какой скоростью вращается человек на гигантских шагах предыдущей задачи, если длина каната 5 м?

87. Во сколько раз должно увеличиться число оборотов земного шара, чтобы центробежная сила тела на экваторе вполне уравновесила его вес?

88. При каком числе оборотов в минуту центробежная сила у маховика с средним диаметром $D=4$ м будет равна его весу?

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

РАБОТА СИЛ.

§ 75. Понятие о работе. Вот перед нами медленно катится тяжело нагруженная ручная тележка; вот лошадь с трудом тянет тяжелый воз. Чтобы привести в движение тележку, человек прилагает определенную силу, точно также лошадь прилагает силу для передвижения

воза. А если на тело действует сила и в результате действия этой силы тело движется, то говорят, что *сила производит работу*.

Для совершения работы необходимо, следовательно, наличие, во-первых, *силы*, действующей на тело, а во-вторых — *движения этого тела*. При отсутствии хотя бы одного из этих признаков отсутствует и работа.

Так, неподвижно стоящий стол хотя и подвержен действию силы тяжести, но эта сила не совершает работы, так как не вызывает движения стола, а уравнивается равным противодействием со стороны пола. Точно также и равномерное движение тела по закону инерции не сопровождается совершением работы, так как происходит без действия силы.

§ 76. Измерение работы. Зададимся целью подсчитать, какова работа, произведенная человеком и лошадью в рассмотренном нами примере.

Когда лошадь совершит большую работу, когда она везет пустую, или тяжело нагруженную телегу? Конечно, во втором случае работа больше. Следовательно, *величины работы зависят от величины, приложенной для передвижения тела силы*.

Когда лошадь утомится сильнее, если она везет воз на короткое расстояние или если она везет тот же воз на большое расстояние? Не трудно ответить и на этот вопрос. Значит, *длина пройденного под влиянием силы пути также влияет на величину совершаемой работы*.

Поднимая легкий предмет на ничтожную высоту, мы производим при этом сравнительно небольшую работу, так как и сила и пройденный путь относительно невелики; паровой кран поднимает из трюма парохода в порт тяжелый тук на высоту нескольких метров, при этом совершается значительно большая работа. Итак, чем больше величина приложенной силы и пройденный путь, тем больше и произведенная этой силой работа.

Условимся принимать за единицу работы килограммометр, т. е. ту работу, которую совершает сила в 1 килограмм, передвигая тело на 1 метр в направлении своего действия.

Положим, бочка весом в 100 кг была поднята на высоту 2 м. Какова произведенная при этом работа? Поднимая 1 кг на высоту в 1 м, мы совершаем работу в 1 килограммометр. Чтобы поднять не 1, а 100 кг на ту же высоту в 1 м, необходимо приложить силу в 100 раз больше. Она производит работу, равную 100 килограммометрам. Поднимая же указанный груз не на 1 м, а на 2 м, мы тем самым увеличиваем работу в 2 раза и совершим всего $100 \times 2 = 200$ килограммометров.

Таким образом, при измерении работы приходится брать *произведение силы на расстояние, проходимое точкой приложения этой силы в направлении действия ее действия*.

Обозначая величину силы через P кг, путь, пройденный ее точкой приложения в направлении действия силы, через h м, получим выражение для работы:

$$W = Ph \text{ кгм.}$$

Как мы уже отмечали, силы могут быть измеряемы в динах. *Работа силы в 1 дину на протяжении 1 см по направлению ее действия носит название эрга.*

В технике имеет применение *джоуль*, равный 10^7 эргов.

§ 77. **Трение при скольжении.** В том случае, когда нам приходится поднимать груз вертикально вверх, не трудно вычислить величину произведенной при этом работы — она будет равна произведению веса груза на высоту его поднятия.

Тогда же, когда груз движется по некоторой поверхности, а не поднимается вверх, подсчитать величину произведенной работы значительно сложнее, ибо развиваемая двигателем сила бывает обычно менее веса этого груза, составляя только некоторую его часть. Так, например, чтобы двигать по гладкому полу массивный стол весом в 25 кг, надо приложить силу всего только в 10 кг; лошадь, везя по хорошему шоссе экипаж в 1000 кг, развивает усилие в 50 кг и т. д.

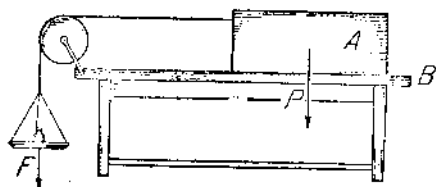


Рис. 64.

С помощью динамометра легко измерить величину силы, необходимой для движения тела (см. стр. 28).

На рис. 64 изображен прибор, называемый *трибометром*, который служит для измерения силы трения. Тело *A* весом *P* помещается на горизонтальную доску *B*. К телу привязана веревка, перекинутая через блок и прикрепленная к чашке

для гирь. Постепенно увеличивая вес гирь, добиваются такого момента, когда от легкого толчка тело *A* начнет равномерно двигаться по доске *B*. Горизонтальная сила *F*, приложенная к телу, равна весу гирь и чашки. Эта сила *F*, преодолевающая трение тела *A* о поверхность доски *B*, равна и прямо противоположна силе трения.

Так как доска *B* горизонтальна, то давление на нее тела *A* (так называемое *нормальное¹ давление*) равно весу этого тела, т. е. *P*.

Увеличим вес тела *A*, положив на него какой-либо груз. Чтобы вновь заставить его от легкого толчка равномерно двигаться по поверхности доски *B*, на чашку придется также добавить гири.

Продолжая несколько опытов, будем брать для каждого из них отношение силы трения *F* к нормальному давлению *P*. Во всех случаях мы получим одинаковую величину:

$$\frac{F}{P} = K. \quad (*)$$

Это отношение (*K*) силы трения к нормальному давлению носит название *коэффициента трения*.

Как показывает опыт, *коэффициент трения не зависит от величины трущихся поверхностей, а зависит только от их материала и состояния*. Кроме того, коэффициент трения в состоя-

¹ Т. е. перпендикулярное ее поверхности.

нии покоя (в начале движения) больше, чем во время продолжающегося движения.

Приводим данные о коэффициентах трения при скольжении для разных материалов.

Материал трущихся тел	Состояние трущихся поверхностей	Коэффициент трения	
		Покоя	Движения
Чугун по чугуну	Насухо	—	0,21
» » » или бронзе	Слабая смазка	0,16	0,15
Чугун по железу	Насухо	0,19	0,18
» » »	Слабая смазка	—	0,16
Железо по железу	Насухо	—	0,44
» » »	Слабая смазка	0,13	—
Железо по бронзе	» »	—	0,15
Дерево по дереву, паралл. волоку . .	Насухо	0,62	0,48
» » » » »	Смаз. сухим мылом	0,44	0,16
Дерево по дереву, перпенд. волоку . .	Насухо	0,54	0,34
» » » » »	Смоченные водой	0,71	0,25
Камень по камню	Насухо	0,50—0,70	—
» » железу	»	0,45	—
» » дереву	»	0,40—0,50	—
Дерев. полозья по гладкому кам. или дер. пути	»	—	0,38
Дерев. полозья по снегу или льду . .	»	—	0,035
Дерев. полозья, обитые железом, по снегу и льду	»	—	0,02

Из формулы (*) можно найти силу трения F :

$$F = KP,$$

т. е. сила трения равна нормальному давлению, умноженному на коэффициент трения.

Примеры: 1. Требуется найти работу, совершенную на расстоянии 100 м при передвижении по снегу саней весом 400 кг. Коэффициент трения 0,02.

Сила трения:

$$F = 0,02 \cdot 400 = 8 \text{ кг.}$$

Работа R на участке $L = 100 \text{ м.}$

$$R = F \cdot L = 8 \cdot 100 = 800 \text{ кгм.}$$

2. Найти коэффициент трения, если известно, что для движения тела весом 100 г по горизонтальному столу нужна сила 23 г.

$$K = \frac{F}{P} = \frac{23}{100} = 0,23.$$

§ 78. Трение при качении. Когда тело катится на колесах, катках, шариках и т. д., то происходящее при этом трение носит название *трения качения*.

Трение при качении значительно меньше трения при скольжении. Вот почему всегда стараются скольжение замонить качением. Так, при передвижении тяжелых тел под них часто подкладывают катки.



Рис. 65.

При движении повозок кроме трения при качении их колес происходит трение скольжения ступиц колес об оси. Чтобы уменьшить это последнее, у автомобилей и велосипедов обычно применяют *шарикоподшипники* (рис. 65). Внутренняя обойма шарикоподшипника надевается на ось, а наружная прикрепляется к ступице колеса. Трение скольжения заменяется при применении шарикоподшипников трением качения.

§ 79. Сопротивление повозок. Сопротивление повозок движению происходит в результате трения при качении колес и трения в осях. *Отношение усилия, необходимого для преодоления трения (силы трения), к нормальному давлению носит название коэффициента сопротивления дороги или коэффициента тяги.*

Приводим данные о коэффициентах сопротивления для различных дорог.

Данные эти очень приближенные, так как коэффициент тяги зависит не только от состояния дороги, но и от рода и состояния движущейся по ней повозки

Железнодорожные рельсы	0,003 — 0,005
Рельсы городских железных дорог	0,006 — 0,008
Хорошая асфальтовая мостовая	0,010
Обыкновенное шоссе в хорошем состоянии	0,016
Хорошая деревянная мостовая	0,018
Хорошая булыжная мостовая	0,02 — 0,03
Плохая булыжная мостовая	0,04 — 0,09
Шоссе покрытое грязью	0,04
Грунтовые дороги	0,08 — 0,16
Сыпучий песок	0,15 — 0,30

Пример. Требуется определить, какую силу тяги должен развивать паровоз для движения 60 товарных груженных вагонов, весом по 20 т каждый, по прямому и горизонтальному рельсовому пути?

Полный вес поезда $60 \times 20 = 1200$ т. Коэффициент тяги равен 0,005, следовательно, движущая сила составляет 0,005 от силы веса, и паровоз должен развивать усилие всего только $0,005 \times 1200 = 6$ т, т. е. 6000 кг.

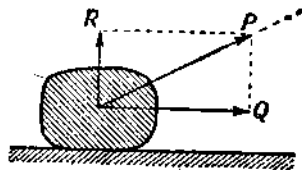


Рис. 66.

§ 80. Работа силы под углом. В рассмотренных выше примерах направление силы совпадало с направлением движения. Рис. 66 изображает камень, который тянут за веревку, причем направление силы P не совпадает с направлением движения. Пользуясь правилом параллелограмма сил, разложим силу P на две силы: силу Q , направленную

вдоль пути, и силу R , ей перпендикулярную. Вторая сила никакого перемещения телу не сообщит, а, следовательно, и не произведет работы; сила же Q приведет тело в движение. Чтобы получить произведенную ею работу придется ее величину помножить на длину пройденного пути L .

Из рис. 66 видно, что $Q = P \cos \alpha$, где α — угол между направлением силы P и Q .

Таким образом, произведенная работа будет равна

$$QL = PL \cos \alpha,$$

т. е. работа силы, составляющей угол α с направлением движения, равна произведению силы на пройденный путь и на косинус угла α между направлением силы и направлением пути.

§ 81. Мощность. Вас спросили, которая из двух машин работоспособнее: совершившая 1 000 кг·м, или другая, давшая работу в 200 кг·м? Можно ли определенно ответить на этот вопрос? Конечно, нет. Для суждения о работоспособности машины недостаточно знать величину совершенной ею работы, нужно еще знать и время, затраченное на производство этой работы. Может быть, первая из указанных машин хотя и дала работу больше в 5 раз, чем вторая, но зато и время для этого затратила значительно больше.

Для правильного суждения о работоспособности двигателя удобно руководствоваться отношением величины работы ко времени (обычно за единицу времени принимается 1 секунда). Это отношение называется *мощностью*.

На практике для измерения мощности пользуются *лошадиной силой, равной работе 75 килограммометров в секунду*.

Решим задачу: какую мощность развивала машина, если она в течение 1 мин. 40 сек. (100 сек.) подняла груз в 15 т на высоту 20 м?

Вся работа, совершенная машиной, $15\,000 \times 20 = 300\,000$ килограммометров, т. е. $\frac{300\,000}{100} = 3\,000 \frac{\text{кг-м/сек}}{\text{сек}}$, или $\frac{3\,000}{75} = 40$ лш. сил.

Отметим, что лошадиная сила обычно сокращенно обозначается буквами «л. с.» или «HP» — от соответствующих английских слов: «Horse» — лошадь и «Power» — сила.

Не трудно вывести формулу, выражающую мощность двигателя в лошадиных силах.

Обозначим величину силы, совершающей работу,	через P кг
» » пройденного пути	» l м
» » времени действия силы	» t сек
» » искомой мощности двигателя	» W л. с.

$$W = \frac{P \cdot l}{t \cdot 75} \text{ л. с.}$$

Следует иметь в виду, что мощность живой лошади обычно не превышает 80% указанной выше теоретической лошадиной силы. Человек же при 8-часовом

рабочем дне может развивать в среднем мощность от 0,07 до 0,16 *HP*, хотя на короткие промежутки времени его мощность может достигать значительно большей величины. Так, пловец или велосипедист может в течение нескольких минут работать чрезвычайно интенсивно, после чего ему понадобится продолжительный отдых.

§ 82. Преобразование работы. В тех случаях, когда имеющейся в нашем распоряжении силы бывает недостаточно для совершения работы, приходится эту работу преобразовывать.

Прииспособления, предназначенные для преобразования работы, получили название *машин*. *Простые машины*: рычаг, блок, ворот, наклонная плоскость, клин, винт; их действие мы сейчас рассмотрим. *Сложные машины* представляют собой соединение нескольких простых.

Простыми машинами всегда пользуются рабочие, когда им приходится поднимать тяжелые, непосильные для человека грузы.

§ 83. Рычаги. Одной из наиболее распространенных простых машин является *рычаг*, известный человечеству еще с древних пор. Он представляет собой негибкий стержень, имеющий точку опоры, вокруг которой он может вращаться.

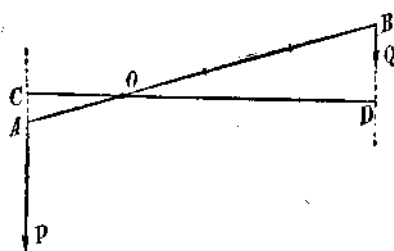


Рис. 67.

Предположим, нам нужно поднять на некоторую высоту груз весом 200 кг. Так как нашей собственной силы недостаточно для совершения этой работы, то мы воспользуемся услугами рычага. Расположим точку опоры ближе к тому из его концов, к которому прикреплен груз. Прикладывая к другому, длинному концу нашу

силу в 20 кг, мы заметим, что при некотором положении точки опоры этой силы будет достаточно для уравнивания груза.

Измеряя затем расстояние от точки опоры до точки приложения силы веса груза и сравнивая с расстоянием от точки опоры до места приложения нашей силы, мы заметим, что второе больше первого в 10 раз.

Производя несколько подобных опытов, мы придем к заключению, что *рычаг будет в равновесии, если величины сил обратно пропорциональны плечам* (плечами рычага условимся называть расстояния от точки опоры до точек приложения сил), т. е. (см. рис. 67):

$$\frac{P}{Q} = \frac{OB}{OA}.$$

К такому же выводу можно было бы прийти на основании правила о нахождении равнодействующей двух параллельных сил, направленных в одну сторону.

Рычаг *AB* будет в равновесии только тогда, когда равнодействующая сил (стр. 35) *P* и *Q* пройдет через точку опоры *O*, т. е. когда

$$\frac{OB}{OA} = \frac{P}{Q},$$

Этот же выход можно получить, воспользовавшись учением о моментах сил. Рычаг AB будет в равновесии, если алгебраическая сумма моментов сил P и Q относительно точки опоры O равна нулю, т. е.

$$Q \cdot OD - P \cdot OC = 0,$$

$$Q \cdot OD = P \cdot OC,$$

$$\frac{P}{Q} = \frac{OD}{OC}.$$

или
откуда

Из подобия треугольников OAC и OBD имеем:

$$\frac{OD}{OC} = \frac{OB}{OA},$$

откуда

$$\frac{OB}{OA} = \frac{P}{Q}.$$

В рассмотренном нами примере мы воспользовались рычагом, у которого

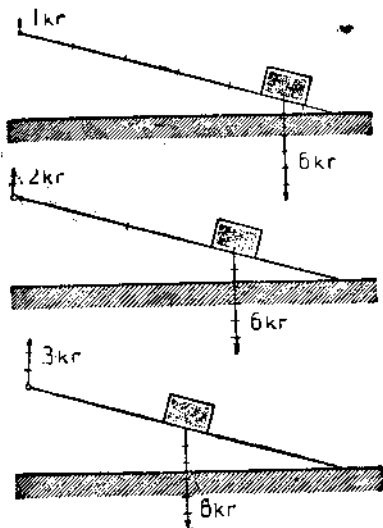


Рис. 68.

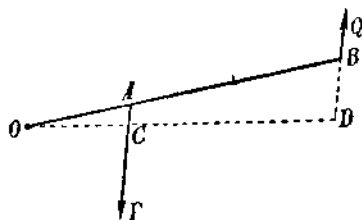


Рис. 69.

точка опоры лежит между точками приложения сил (обе силы направлены в одну сторону); он носит название *рычага 1-го рода*.

Если же силы приложены по одну сторону от точки опоры и направлены в разные стороны, рычаг именуется *рычагом 2-го рода*.

На рис. 68 изображено несколько случаев равновесия рычага 2-го рода. Сравнивая величины сил и отношение плеч, мы приходим к заключению, что и рычаг 2-го рода точно так же будет в равновесии, если силы обратно пропорциональны величинам плеч, т. е. (см. рис. 69) если:

$$\frac{P}{Q} = \frac{OB}{OA}.$$

К этому же выводу мы придем, воспользовавшись правилом о нахождении равнодействующей двух параллельных сил, направленных в разные стороны (стр. 37). Рычаг будет в равновесии только тогда, когда равнодействующая сил P и Q пройдет через точку опоры O , т. е.

$$\frac{OB}{OA} = \frac{P}{Q}.$$

Тот же вывод можно получить, пользуясь учением о моментах. Для равновесия рычага OB необходимо, чтобы алгебраическая сумма моментов сил P и Q была равна нулю:

$$P \cdot OC - Q \cdot OD = 0,$$

или

$$P \cdot OC = Q \cdot OD,$$

т. е. моменты сил P и Q по абсолютному значению должны быть равны.

Следовательно,

$$\frac{P}{Q} = \frac{OD}{OC}.$$

Заменяя на основании подобия треугольников OAC и OBD отношение $\frac{OD}{OA}$ через $\frac{OB}{OA}$, имеем:

$$\frac{OB}{OA} = \frac{P}{Q}.$$

Действуя на длинное плечо рычага, мы имеем возможность сравнительно малой силой уравновесить и поднять более тяжелый груз.

Измеряя тот путь, который проходит груз при поднятии, и сравнивая его затем с расстоянием, проходимым точкой приложения нашей силы, мы заметим, что это последнее будет значительно больше.

Пусть груз в 200 кг был поднят на высоту $\frac{1}{4}$ м, уравновешивающая его сила в 40 кг проходит при этом, как показывает опыт, расстояние в $\frac{5}{4}$ м, т. е. то, что выигрывается при применении рычага в силе, теряется в пройденном пути.

Работа, совершенная рычагом $= 200 \times \frac{1}{4} = 50$ кгм, равна работе, совершенной нашей силой $40 \times \frac{5}{4} = 50$ килограммометров.

Итак, рычаг не дает выигрыша в работе, а только ее преобразует. То, что выигрывается в силе, проигрывается в пройденном пути.

Работа силы P (двигателя) равна работе силы Q (сопротивления). На это положение, одинаково справедливое не только для рычага, но и для всех машин, нам неоднократно придется сослаться в дальнейшем.

Примерами рычагов первого рода являются: обыкновенно весы (рис. 70), пилбаум, журавль у колодца, ножницы, щипцы для колки сахара, безмен (рис. 71).

Предилечье (рис. 72), тачка, щипцы для колки орехов могут послужить примерами рычагов второго рода.

§ 84. Неподвижный блок. Блок представляет собой одну из наиболее распространенных простых машин. Неподвижный блок состоит

из колесика (рис. 73) с желобком, через которое перекинута веревка; концы оси колесика входят в отверстия в неподвижной обоймице.

Предположим, вам нужно поднять вертикально вверх некоторое тело, хотя бы «люльку» с рабочим маляром, красящим стену дома.

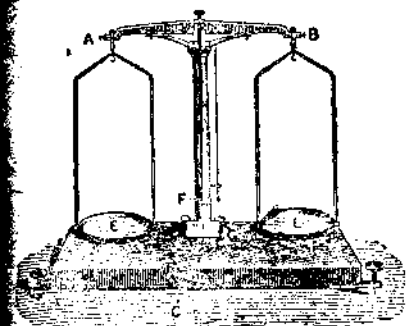


Рис. 70.

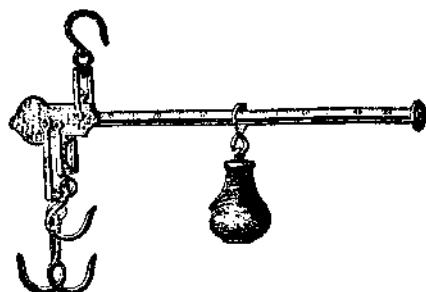


Рис. 71.

Прикрепив к этому телу веревку, перекроем ее через блок и начнем тянуть за другой конец.

Таким образом, на блок, кроме противодействия (реакции) опоры (давления обоймицы на ось), действуют две силы — вес тела P и наша сила Q .

Первая сила (P) стремится произвести вращение в направлении, указанном стрелкой (рис. 74), момент этой силы $P \cdot r$, где r — радиус блока, т. е. расстояние от оси вращения до линии действия силы.

Вторая сила (Q) стремится произвести вращение в обратном направлении, ее момент $= Q \cdot r$.

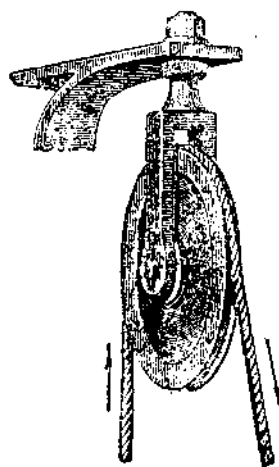


Рис. 73.



Рис. 72.

Блок будет в равновесии, когда моменты уравновесят друг друга, т. е.

$$P \cdot r = Q \cdot r,$$

откуда

$$P = Q.$$

(*)

Таким образом, в неподвижном блоке выигрыша в силе нет, для поднятия груза нужно приложить силу, равную его весу.

Зачем же тогда пользуются блоком? Блок меняет направление силы. Вместо того чтобы поднимать тело вверх, вы тянете веревку вниз, что, конечно, значительно удобнее. Наши маляры могли бы взобраться на крышу и тянуть веревку с «люлькой» вверх, но им удобнее воспользоваться блоком и тянуть веревку книзу.

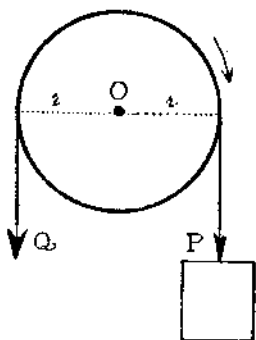


Рис. 74.

§ 85. Подвижной блок (рис. 75) состоит из обоймы, обращенной вниз, к которой подвешивается груз (Q). Веревка, перекинутая через подвижной блок, привязана одним концом к неподвижной точке F , другой ее конец перекинут через неподвижный блок и к нему приложена сила P .

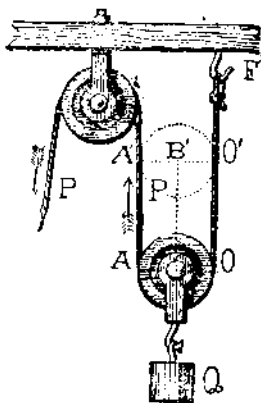


Рис. 75.

Неподвижный блок меняет только направление силы; поэтому к точке A подвижного блока передается сила $= P$. От действия этой силы блок будет поворачиваться вокруг точки O . Момент силы P равен $P \times AO = P \cdot 2r$.

В случае равновесия момент силы Q должен оказывать равное противодействие.

Так как он равен $Q \times r$, то

$$P \cdot 2r = Q \cdot r,$$

или

$$P = \frac{Q \cdot r}{2r} = \frac{Q}{2}.$$

(**)

Таким образом, в подвижном блоке в силе выигрывается в два раза. Однако, если точка приложения силы P пройдет некоторый путь, то точка приложения силы Q пройдет путь в два раза меньший, т. е. то, что выигрывается в силе, проигрывается в пройденном пути; работа же, совершенная силой P , равняется работе силы Q .

§ 86. Тали или полиспаст. Для подъема тяжелых грузов часто пользуются сочетанием из нескольких блоков. Такое сочетание именуется полиспастом, или тали.

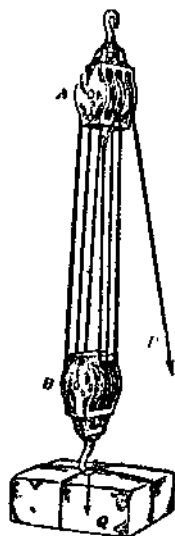


Рис. 76.

На рис. 76 изображен полиспаст, состоящий из трех подвижных блоков, заключенных в общей обойме B . В верхней обойме A заключено три неподвижных блока. Канат прикреплен к верхней обойме. Он охватывает сначала первый подвижной блок, затем первый неподвижный и т. д. К свободному концу приложено усилие P .

При числе канатов, подвешивающих груз Q , равном n (в нашем случае $n=6$), усилие, направленное вверх, равно nP , т. е.

$$Q = nP,$$

откуда

$$P = \frac{Q}{n}, \quad (***)$$

т. е. сила двигателя, приложенная к свободному концу каната, равна весу груза, деленному на число канатов, на которых он подвешен.

В нашем случае

$$P = \frac{Q}{6}.$$

§ 87. Коэффициент полезного действия блоков. Соотношения между силой двигателя P и сопротивлением Q (*) и (***) были нами получены, не учитывая вредных сопротивлений.

В неподвижном блоке для равновесия необходимо, чтобы $P=Q$. Для подъема груза к силе P нужно добавить еще некоторую силу на преодоление трения в оси блока. Кроме того, приходится прилагать добавочную силу на сгибание каната.

Назовем величину добавочной силы, преодолевающей вредные сопротивления, через p . В таком случае движущая сила будет равна $P+p$.

Отношение

$$\frac{P}{P+p} = K$$

носит название *коэффициента полезного действия блока*. Для неподвижного блока оно составляет обычно около 95—97%, т. е. 95—97% от приложенного усилия идет на поднятие груза, а 3—5% идет на преодоление вредных сопротивлений.

В подвижном блоке к указанным выше вредным сопротивлениям добавляется еще вес самого подвижного блока, который приходится поднимать вместе с грузом.

В полиспастах чем больше блоков, тем, конечно, меньше их коэффициент полезного действия.

В полиспасте, изображенном на рис. 76, коэффициент полезного действия не превышает 75%.

§ 88. Ворот. В деревнях для поднятия воды из колодца часто пользуются простой машиной — *воротом* (рис. 77). Ворот состоит из вала B , который вращается посредством рукоятки или колеса A , при этом на вал наматывается веревка, к концу которой прикрепляется ведро с водой.

Приложенная нами к рукоятке сила стремится произвести вращение ворота, ведро же с водой стремится вращать его в обратную сторону. Равновесие будет при равенстве моментов этих сил относительно оси вращения.

Момент силы, приложенной к рукоятке (см. рис. 78) $= P \cdot R$.

Момент силы веса груза $= Q \cdot r$.

$$P \cdot R = Q \cdot r,$$

откуда

$$\frac{P}{Q} = \frac{r}{R},$$

т. е. при равновесии ворота приложенная к рукоятке сила во столько раз меньше веса груза, во сколько радиус вала меньше радиуса круга, описываемого рукою.

Для подъема груза к силе P нужно добавить еще некоторую силу p на преодоление трения.

Отношение

$$\frac{P}{P+p} = K$$

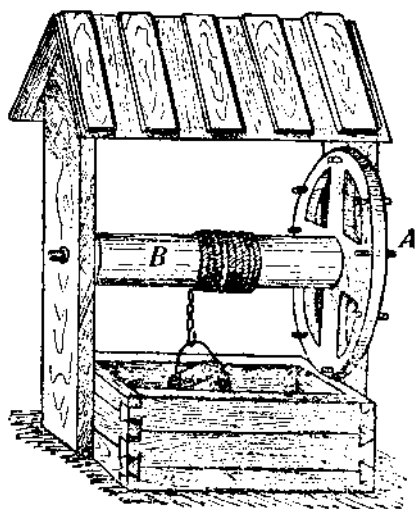


Рис. 77.

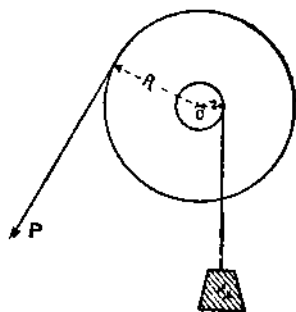


Рис. 78.

носит название *коэффициента полезного действия ворота*. Он не превышает 85%.

За время одного полного оборота, описанного нашей рукою, вал также совершит один полный оборот, и груз Q поднимется на высоту, равную длине окружности вала. Из геометрии известно, что длины окружностей прямо пропорциональны их радиусам.

Назовем путь, пройденный за один оборот нашей рукою (т. е. длину окружности, описанной рукою), через L , длину окружности вала, иначе говоря, путь, проходимый силой веса Q , через K ; имеем:

$$\frac{K}{L} = \frac{r}{R}.$$

Сравнивая с предыдущей пропорцией, получим:

$$\frac{P}{Q} = \frac{K}{L}.$$

а следовательно, $PL = KQ$, т. е. при каждом обороте вала работа, совершенная силой Q , равна работе, совершенной силой P . Выигрыш в силе равен проигрышу в пройденном пути.

Если бы мы потянули за веревку, намотанную на вал, мы заставили бы рукоятку очень быстро вращаться. Мы проиграли бы в силе, но зато выиграли бы в пройденном пути, иначе говоря, в скорости.

Вертикальный ворот носит название *кабестана* (рис. 79).

§ 89. Ведущие колеса паровозов. Обращали ли вы внимание на различие в устройстве ведущих колес у паровозов скорых поездов и товарных?

Первые всегда имеют сравнительно большие размеры: так, например, один из новейших паровозов баденских железных дорог имеет ведущие колеса с диаметром 210 см (рис. 80). Наоборот, ведущие колеса товарных паровозов, а также паровозов, приспособленных для горных участков, имеют малые диаметры, как, например, паровоз, изображенный на рис. 81 (диаметр равен 70 см.).

Обозначим силу, с которой шатун вращает колесо, через F (рис. 82), ее вращающий момент равен $F \cdot r$. Эта сила заставляет вращаться

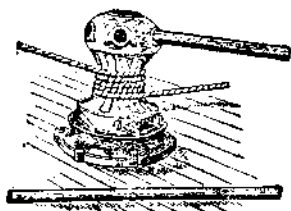


Рис. 79.

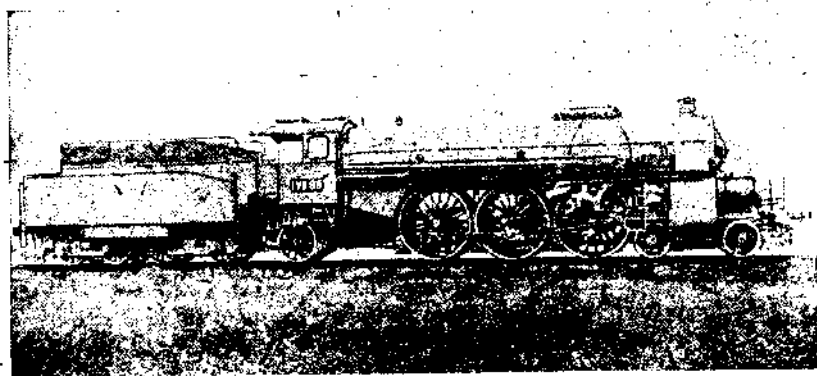


Рис. 80.

колесо и вызывает толкающую силу S , производимую его ободом на рельс, который оказывает равное и противоположное противодействие S . Вращающий момент этой силы S равен $S \cdot R$.

Условие равновесия:

$$F \cdot r = S \cdot R; \frac{S}{F} = \frac{r}{R},$$

т. е. толкающая сила обода меньше силы давления шатуна во столько раз, во сколько расстояние шатуна до оси вращения колеса меньше его радиуса.

Таким образом, здесь мы имеем проигрыш в силе и, конечно, соответствующий выигрыш в пути. В то время как точка прикрепления

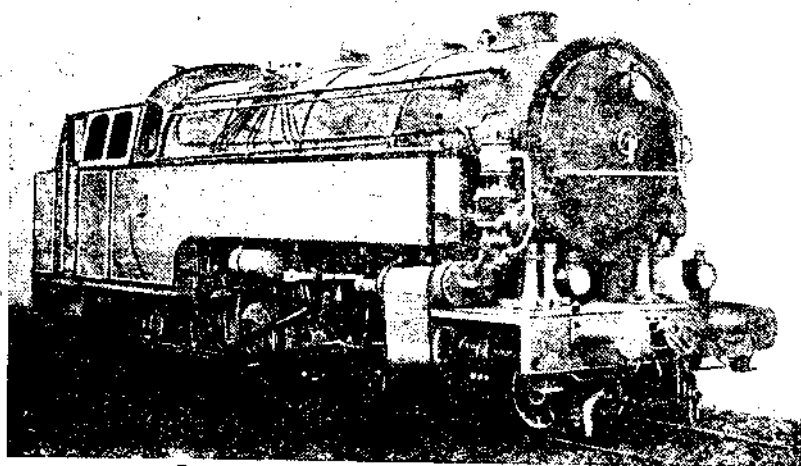


Рис. 81

шатуна к колесу совершает путь, равный длине небольшой окружности радиуса r , точка обода колеса проходит значительно больший путь, равный длине окружности радиуса R . Скорые поезда обычно состоят

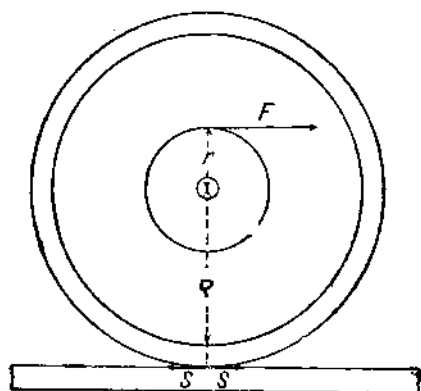


Рис. 82.

всего только из нескольких вагонов. Для приведения их в движение нужна сравнительно небольшая сила, зато необходима значительная быстрота движения. Для них удобно применять ведущие колеса большого диаметра. Хотя здесь и будет большой проигрыш в силе, зато скорость движения такого паровоза будет велика.

Наоборот, товарные поезда обычно состоят из большого числа тяжело нагруженных вагонов. Для их движения нужна сравнительно большая толкающая сила, тогда как особенно быстрого движения от них не тре-

буется. Ведущие колеса небольшого диаметра здесь наиболее пригодны. Точно так же паровозы горных участков должны иметь ведущие колеса малого диаметра, так как для их движения в гору требуется большая толкающая сила.

§ 90. Зубчатые колеса. Для поднятия тяжестей часто пользуются различными *лебедками*, представляющими собой соединенные ворота с

системой зубчатых колес. Чтобы понять их действие, познакомимся более подробно с зубчатыми колесами.

Чтобы уравновесить груз Q (рис. 83), приложим силу P к ободу колеса A , с которым наглухо соединено вращающееся на той же оси маленькое зубчатое колесо a , именуемое *шестерней*. Зубцы шестерни нажимают на зубцы большого зубчатого колеса B с некоторой силой y , это последнее оказывает равное и прямопротивоположное противодействие y . Вместе с зубчатым колесом B вращается около той же оси наглухо с ним скрепленный вал, на который наматывается веревка, поднимающая груз.

Будем рассматривать систему зубчатых колес как соединение двух ворот I и II. На первый ворот действуют две силы — P и y , на второй x и Q . Условия равновесия I ворота — равенство моментов сил относительно центра колеса A :

$$P \cdot R_1 = y \cdot r_1,$$

где R_1 — радиус колеса A , а r_1 — радиус шестерни a . Откуда

$$y = \frac{PR_1}{r_1},$$

Условия равновесия II ворота — равенство моментов сил относительно центра колеса B :

$$xR_2 = Qr_2$$

(R_2 — радиус колеса B , r_2 — радиус вала), откуда

$$x = \frac{Qr_2}{R_2}.$$

С какой силой давят зубцы шестерни a на зубцы большого колеса B , с такой же силой оно оказывает противодействие, т. е.

$$x = y,$$

или

$$\frac{Qr_2}{R_2} = \frac{PR_1}{r_1}.$$

Переставляя члены в этой пропорции, получим следующее соотношение:

$$\frac{P}{Q} = \frac{r_1 r_2}{R_1 R_2},$$

т. е. при равновесии зубчатых колес приложенная сила P во столько раз меньше веса груза Q , во сколько произведение радиусов шестерни и вала меньше произведения радиусов колес A и B .

Чтобы заставить подниматься груз Q , к силе P необходимо прибавить некоторую силу p на преодоление вредных сопротивлений.

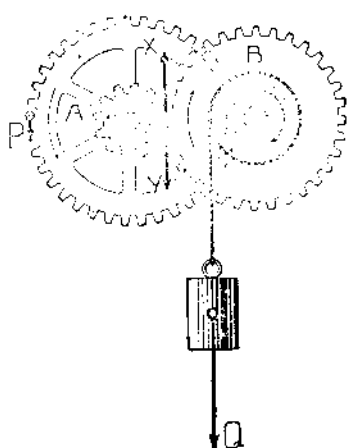


Рис. 83.

Отношение

$$\frac{P}{P+p} = K$$

носит название *коэффициента полезного действия зубчатых колес*.

Зубчатыми колесами часто пользуются для передачи движения от одного вала к другому. В том случае, когда оси валов параллельны между собою, пользуются *цилиндрическими зубчатыми колесами* (см.

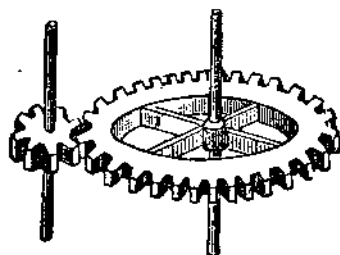


Рис. 84.

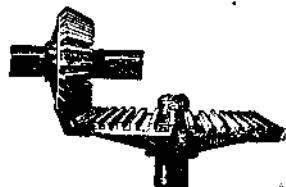


Рис. 85.

рис. 84), если же оси валов составляют между собой некоторый угол, применяют *конические зубчатые колеса* (см. рис. 85).

Решим задачу. Большое зубчатое колесо, изображенное на рис. 84, имеет 30 зубцов и вращается со скоростью 10 оборотов в секунду; его вращение передается малому зубчатому колесу, имеющему 8 зубцов. Какое число оборотов в секунду будет совершать оно?

При повороте большого колеса на один зубец маленькое колесо поворачивается также на один зубец. Полный оборот большого колеса соответствует, следовательно,

$$\frac{30}{8} = 3 \frac{3}{4} \text{ оборота маленького колеса, и оно будет}$$

вращаться со скоростью $10 \times \frac{15}{4} = 37 \frac{1}{2}$ оборота в секунду.

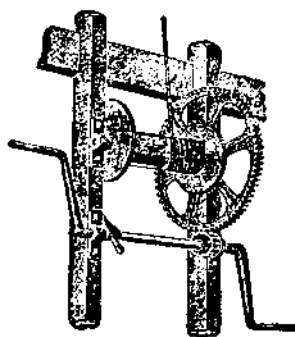


Рис. 86.

Как нужно поступить, чтобы, имея сравнительно медленное движение некоторого вала, заставить другой вал вращаться более быстро?

Нужно насадить на медленно вращающийся вал зубчатое колесо большого радиуса, а следовательно, с большим числом зубцов, сцепить с ним другое зубчатое колесо малого радиуса с небольшим числом зубцов; это последнее, а вместе с ним и вал, на который оно насажено, будет вращаться быстрее, чем первый вал.

На рис. 86 изображена *лебедка*, представляющая собою соединение ворота с зубчатыми колесами.

В часовом механизме имеется сложная система зубчатых колес. Медленное, незаметное глазу движение одного из них, непосредственно связанного с раскручивающейся пружиной, передается, в конце концов, валу, на который насажена сравнительно быстро вращающаяся секундная стрелка.

§ 91. Наклонная плоскость. Наклонная плоскость представляет одну из простых машин, известную еще с древних времен; за много веков до начала общепринятой эры египтяне пользовались ею для поднятия тяжелых камней при постройке пирамид. В настоящее время наклонная плоскость широко применяется для втаскивания туюков, катывания бочек на повозки, платформы, при выгрузке и погрузке судов и т. д.

Вкатывая тяжелую бочку по достаточно пологой наклонной плоскости, мы обычно развиваем силу, значительно меньшую, чем вес бочки.

Выведем условие равновесия тела на наклонной плоскости. Силу веса Q , действующую на тело (рис. 87), разложим на две; силу P — параллельную длине наклонной плоскости и силу R — ей перпендикулярную.

Вторая из этих сил вызовет со стороны наклонной плоскости равное и прямо противоположное противодействие, которым и будет уничтожена. Сила P приведет тело в движение.

Чтобы удержать его на месте, необходимо приложить к телу равную и прямо противоположную силу P_1 . Отношение силы P_1 к Q легко найти, пользуясь известным нам положением: «Работа двигателя равна работе сопротивления». Если бы мы поднимали тело вертикально вверх, то приложили бы силу Q , равную его весу. Работа, совершенная этой силой, была бы равна $Q \cdot H$, где H — высота поднятия. Под влиянием же силы P_1 (если пренебрегать трением и сопротивлением воздуха) тело будет двигаться по наклонной плоскости и, чтобы достичь высоты H , пройдет путь, равный ее длине, т. е. L . Работа силы P_1 будет равна $P_1 \cdot L$.

Так как работа двигателя равна работе сопротивления:

$$P_1 \cdot L = Q \cdot H,$$

откуда

$$\frac{P_1}{Q} = \frac{H}{L} \quad (*)$$

т. е. в случае равновесия тела сила, параллельная длине наклонной плоскости, во столько раз меньше веса тела, во сколько высота наклонной плоскости меньше ее длины.

К тому же выводу легко прийти и чисто математическим путем. $\triangle ABC$ подобен $\triangle QOR$, как составленный взаимно перпендикулярными сторонами. Из подобия треугольников следует, что их сходственные стороны пропорциональны, т. е.

$$\frac{P}{Q} = \frac{BC}{AB}.$$

Из этой же пропорции следует $P \cdot AB = Q \cdot BC$, т. е. работа двигателя равна работе сопротивления.

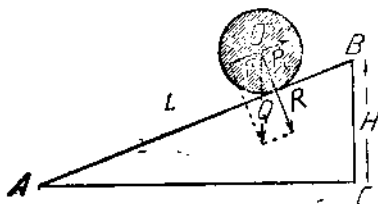


Рис. 87.

Для движения тела по наклонной плоскости к силе P нужно добавить некоторую силу p на преодоление трения. Эта сила p равна нормальному давлению R , умноженному на коэффициент трения K :

$$p = KR.$$

Таким образом, движущая сила N составит $P_1 + KR$. Заменяя P_1 из равенства (1) через $Q \frac{H}{L}$ имеем:

$$N = Q \frac{H}{L} + KR.$$

Но $\frac{H}{L} = \sin \alpha$, где α — угол, составленный наклонной плоскостью с горизонтом; он равен углу между направлением сил Q и R , как углы с взаимно перпендикулярными сторонами.

$$R = Q \cos \alpha.$$

В свою очередь

$$N = Q \sin \alpha + KQ \cos \alpha,$$

или

$$N = Q (\sin \alpha + K \cos \alpha).$$

Чтобы выяснить условие равновесия тела на наклонной плоскости в том случае, когда оно удерживается силой, параллельной основанию этой плоскости (см. рис. 88), разложим силу веса Q на две силы P и R , из которых первая параллельна основанию AC , а вторая ей перпендикулярна. Сила R уничтожается сопротивлением наклонной плоскости, сила P заставит тело скатываться. Чтобы его удержать, необходимо приложить равную и противоположную ей силу P_1 .

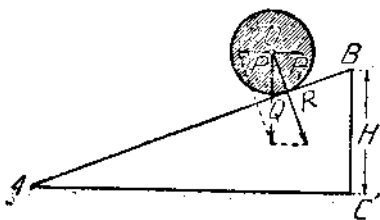


Рис. 88.

Вывод, подобный предыдущему, приводит нас к заключению, что:

$$\frac{P_1}{Q} = \frac{BC}{AC},$$

т. е. сила P_1 меньше груза Q во столько раз, во сколько высота наклонной плоскости BC меньше ее основания AC .

Так как в прямоугольном треугольнике ABC катет AC всегда меньше гипотенузы AB , то отношение $\frac{BC}{AC}$ всегда меньше отношения $\frac{BC}{AB}$ и поднятие тела силой, параллельной основанию наклонной плоскости, менее выгодно, чем поднятие силой, параллельной ее длине.

§ 92. Устройство железнодорожного пути. Обращали ли вы внимание на то, что железнодорожный путь очень часто имеет множество закруглений, тогда как на первый взгляд казалось бы значительно проще вести его по прямой, представляющей собой кратчайшее направление между станциями?

Пусть точка A обозначает станцию отправления (рис. 89), а точка B станцию назначения, расположенную значительно выше первой. Кривые aa' , mm' , kk' и ll' — горизонтали, т. е. линии, соединяющие точки поверхности земли с одинаковой высотой: их обычно проводят при съемке планов, так как они характеризуют рельеф

ности. Пусть на рис. 89 они проведены через каждые 50 м, т. е. каждая следующая горизонталь проходит через точки земной поверхности, расположенные на 50 м выше точек предыдущей горизонтали.

Соединим сначала пункты А и В прямою и измерим по масштабу ее длину от горизонтали mn' , на которой находится пункт А, до следующей горизонтали lm' . Пусть она равна 2,5 км. Следовательно, поезду на протяжении 2,5 км придется подняться на высоту 50 м, что соответствует движению по наклонной плоскости, которой основание равно 2,5 км, а высота — 50 м. Кроме силы, необходимой для движения по горизонтальному пути, надо добавить дополнительную силу, чтобы уничтожить его стремление скатываться вниз по наклонной плоскости. Эта сила P_1 меньше веса поезда во столько раз, во сколько высота подъема (50 м) меньше длины пути (2500 м), т. е.

$$\frac{P_1}{Q} = \frac{50}{2500} = \frac{2}{100} = 0,020$$

Отношение высоты подъема к длине пути обычно носит название *уклона пути* и измеряется в тысячных долях. Для нашего случая уклон будет равен в среднем 20 тысячным. Следовательно, сила тяги паровоза должна быть равной для нашего случая 0,005 его веса (для преодоления сопротивления трения на горизонтальном пути) плюс 0,020 его веса (для поднятия по наклонной плоскости). Уклон в 20 тысячных очень велик — для поднятия по такому уклону нужно или иметь весьма солидный паровоз, или возить небольшие составы, что тоже, конечно, невыгодно.

Изменим путь движения поезда так, как показано на рисунке сплошной линией. В таком случае, расстояние от станции А до горизонтали lm' увеличится, измеренное по масштабу, замечаем, что оно равно 5 км. Подъем в 50 м состоит теперь на протяжении пути уже в 5 км, что даст уклон в $\frac{50}{5000}$, т. е. в 10 тысячных. Следовательно, необходимая для движения поезда, в этом случае будет равна $0,005 + 0,010 = 0,015$ его веса.

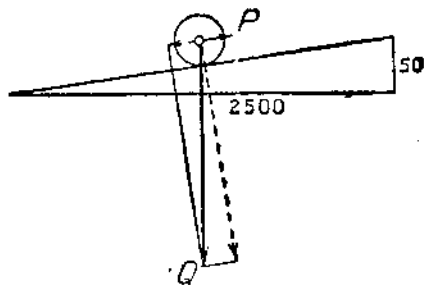
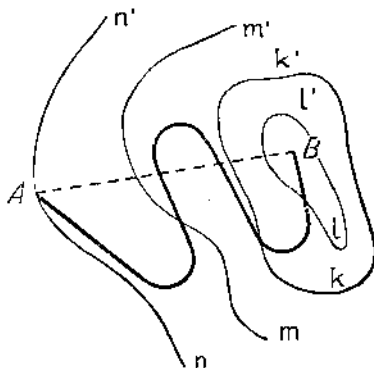


Рис. 89.

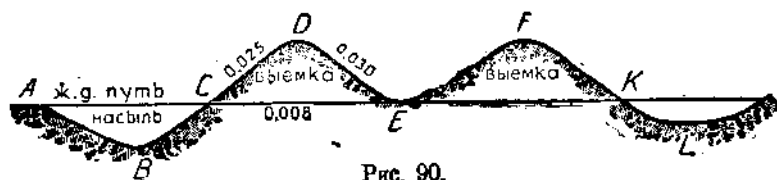


Рис. 90.

Таким образом, проведение железнодорожного пути не по линии кратчайшего расстояния между станциями и значительное удлинение его вследствие закруглений является результатом стремления уменьшить уклоны. Для этой же цели устраивают насыпи и выемки. На рис. 90 изображен профиль некоторого участка пути. Если бы рельсы были проложены соответственно рельефу местности по линии $ABCDEFKL$, то участки BD , DE и т. д. имели бы очень большие уклоны. Устрой-

ство насыпи ABC и выемок CDE и EFG дает возможность провести путь от точки A до точки K с уклоном всего лишь в 8 тысячных и т. д.

Перед постройкой железной дороги предварительно производится *изыскание*, цель которых наметить наилучшее направление пути, т. е., с одной стороны, по возможности избегать значительных уклонов и в необходимости устройства больших насыпей и выемок, с другой стороны — все же выбрать возможно более короткий путь.

Существуют определенные нормы тех наибольших уклонов, которые считаются допустимыми при постройке железных дорог того или иного назначения. Так, для дорог магистрального типа предельный допустимый уклон составляет 0,006, для дорог второстепенных — 0,012 и т. д. При постройке шоссе дорог допускаются значительно большие уклоны.

§ 93. Винт. Вырежьте из картона прямоугольный треугольник ABC (рис. 91), затем возьмите

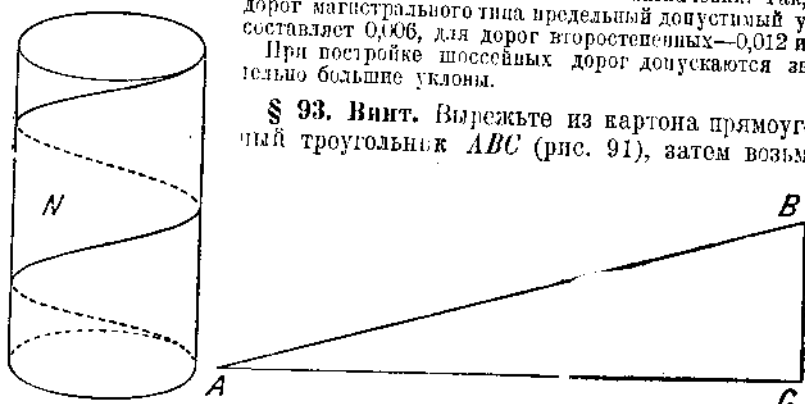


Рис. 91.

цилиндр N , окружность которого равна основанию AC треугольника, и оберните этот треугольник вокруг цилиндра. Его гипотенуза AB расположится по *винтовой линии* и образует один *виток* винта.

Обернув около цилиндра несколько таких треугольников, мы получим достаточно длинную винтовую линию, причем, конечно, расстояние между соседними витками будет равно высоте наших наклонных плоскостей — это расстояние носит название *шага* или *хода винта*.

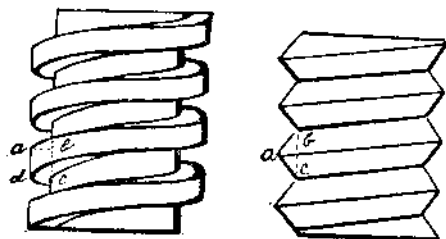


Рис. 92.

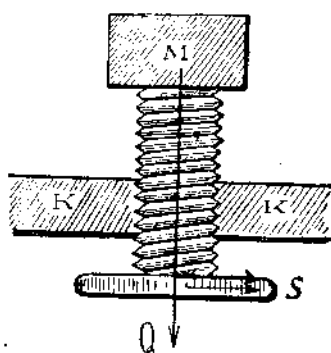


Рис. 93.

Если мы вообразим, что некоторый прямоугольник $abcd$ или треугольник abc (рис. 92) двигаются вдоль винтовой линии, прижимаясь одной из своих сторон к цилиндру, то извилистый выступ, описанный ими, представит собою *прямоугольную* или *треугольную нарезку*.

Если в каком-нибудь твердом теле сделать цилиндрический прорез, расположенным по винтовой линии углублением, соответствующим выступам винта, — мы получим *гайку*.

Пользуясь винтом, можно поднимать тяжелое тело с большим выигрышем в силе.

На рис. 93 изображена неподвижная гайка *K*, входя в которую винт может поднять тяжелое тело *M*. Если бы не было трения поверхности винта о поверхность гайки, то под влиянием своего веса *Q* тело *M* заставило бы скользить винт по нарезам гайки. Это движение стало бы совершаться вполне аналогично движению по наклонной плоскости, так как винтовая линия представляет собой ту же наклонную плоскость. Чтобы удержать винт от вращения, необходимо приложить некоторую силу *S*. Сила *S*, действуя параллельно основанию наклонной плоскости, должна быть во столько раз меньше веса груза *Q*, во сколько высота наклонной плоскости (в данном случае шаг винта) меньше ее основания (окружности винта), т. е.:

$$\frac{S}{Q} = \frac{h}{b}; \quad (b = 2\pi r).$$

Конечно, вместо того, чтобы прилагать силу *S* к поверхности винта, мы приложим нашу силу *P* к его головке. Головка же и самый винт представляют собой ворот, следовательно

$$\frac{P}{S} = \frac{r}{R}$$

где *r* — радиус окружности винта, а *R* — радиус окружности его головки.

Перемножая первое равенство на второе, получим окончательное условие равновесия винта:

$$\frac{P}{Q} = \frac{h}{2\pi R}$$

т. е. сила *P*, действующая на головку винта, меньше силы веса груза *Q* во столько раз, во сколько ход винта *h* меньше окружности его головки.

Пользуясь гаечным ключом как рычагом второго рода, мы еще увеличиваем выигрыш в силе, проигрывая соответствующим образом в пройденном пути.

Теоретический выигрыш в силе при применении винта очень велик. Однако на практике он значительно уменьшается вследствие силы трения.

§ 94. Домкрат. Винт часто применяется для поднятия тяжестей. Рис. 94 изображает *домкрат*, представляющий собой винт, который проходит через гайку, неподвижно скрепленную с основанием домкрата. Головка винта зажимается гаечным ключом или в ее отверстие вставляется стержень — рычаг (или рычаг с собачкой).

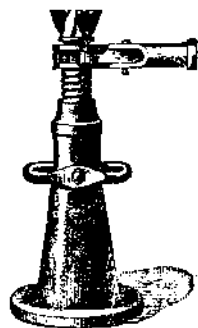


Рис. 94.

Для поднятия тяжелого груза подводят под него домкрат так, чтобы груз опирался на верхнюю часть его головки; вращая затем гаечный ключ или стержень, заставляют винт ввинчиваться в гайку и поднимают при этом груз.

Коэффициент полезного действия домкрата не превышает 35 — 40%.

Часто пользуются винтом для скрепления между собой частей различных приборов, мебели и т. д. Развивающееся при вращении винта трение служит препятствием его движению.

В тех случаях, когда винт ввинчивается не в гайку, а в какую-нибудь среду, его *нарезку делают острой*, чтобы он сам прорезал себе гайку.

§ 95. Толщемер. Укажем еще на одно приложение винта — это для точного измерения сравнительно малых длин.

На рис. 95 показан прибор, называемый *калиброммером* или *толщемером*. Им пользуются для измерения толщины листов бумаги, проволоки и т. д. Измеряемое тело зажимается между неподвижным выступом *b* в рамке калиброммера и ножкой *a*, являющейся окончанием винта *M*.

В том случае, когда выступ *b* соприкасается с ножкой *a*, срез головки винта в точке, отмеченной *O*, совпадает с нулевым делением шкалы. При каждом полном обороте винта ножка *b* отодвигается от выступа *a* на одно деление шкалы *c*, обычно соответствующее 1 мм. Судя по тому, против какого деления шкалы приходится срез головки *d*, можно сделать заключение о числе полных миллиметров (т. е. числе полных оборотов) заключенных в расстоянии *ab*. Кроме того, окружность головки *d* разделена на 100 (или иное число) равных частей. Так как ее полный оборот соответствует передвижению винта на расстояние в 1 мм, то поворот головки на 1 деление изменяет расстояние на 0,01 мм.

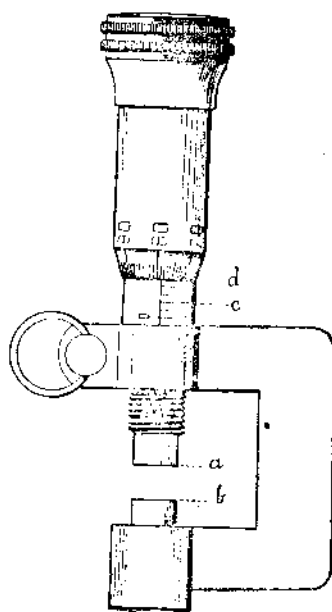


Рис. 95.



Рис. 96.

Таким образом, по шкале *c* можно судить о числе целых миллиметров, заключенных в длине *ab*, деления же на головке указывают на сотые доли миллиметра сверх их целого числа. На рис. 95 расстояние *ab* равно 4,78 мм.

§ 96. Клинь. Клинь представляет собою две наклонных плоскости, соединенных основаниями (рис. 96). В качестве примеров применения клина можно привести все режущие и колющие инструменты, например, нож, топор, булавка и т. д.

При вдвигании клина развивается значительное трение, которое увеличивает силу, необходимую для его перемещения.

§ 97. Задачи и вопросы. 89. Какую работу необходимо совершить для подъема груза весом в 60 кг на высоту 5 м?

90. Какую работу совершит сила тяжести при падении камня весом 100 кг, с высоты 20 м?

91. Какую мощность развивает подъемный кран, если он поднимает камень размерами 2 м $\times$ 1 м $\times$ 0,6 м на высоту 12 м в течение 1 минуты 40 секунд? Удельный вес камня 2,5 г/см³.

92. Тело весом 2 кг равномерно движется по доске трибометра. Каков коэффициент трения, если чашка для гирь весит 30 г и на нее положено 370 г?

93. Какую мощность развивает лошадь, передвигающая повозку весом 1 т со скоростью 4 км в час? Коэффициент тяги составляет 0,034.

94. Сколько времени должна работать лебедка, развивая мощность 6 лш.

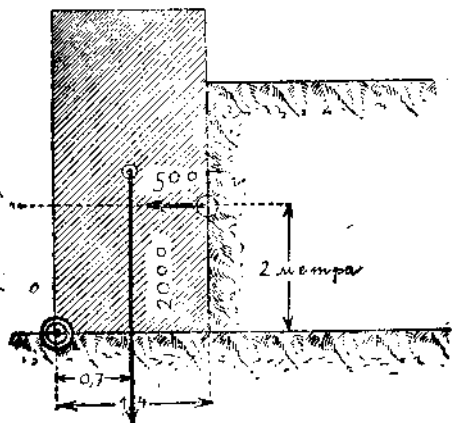


Рис. 97.

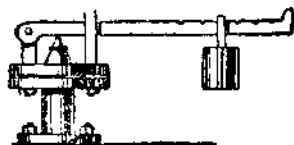


Рис. 98.

сил, поднимая ящик с 4 м³ песку на высоту 15 м? 1 м³ песку весит 2,3 т. Ящик весит 400 кг.

95. Лошадь развивает усилие 50 кг. Какой вес имеет воз, если коэффициент тяги 0,05?

96. Лошадь развивает мощность 0,5 лш. силы и везет воз со скоростью 6 км/час при коэффициенте тяги 0,04. Определить вес воза.

97. Рабочий тянет тележку весом 400 кг. Коэффициент тяги 0,02. Какую работу он совершит на расстоянии 10 м?

98. Баба для забивки свай весом 450 кг должна быть поднимается 16 раз в течение минуты на высоту 1,4 м. Сколько рабочих надо поставить, если мощность каждого рабочего составляет 7 кгм/сек?

99. Водопад дает в течение минуты 900 м³ воды, падающей с высоты 18 м. Какую мощность он развивает?

100. На подпорную стенку, изображенную на рис. 97, производит давление насыпная за нею земля с силой 500 кг. Эта сила приложена на расстоянии 2 м от основания стенки. Вся стенка весит 2000 кг и ее ширина по основанию 1,4 м. Не опрокинется ли стенка?

101. Не вызовет ли давление земли в предыдущей задаче скольжение стенки? Коэффициент трения поверхности стенки о поверхность грунта 0,32.

102. На рис. 93 изображен предохранительный клапан. Какого рода рычаг представляет он?

103. Предохранительный клапан должен открываться при давлении пара в 6 кг/см². Площадь клапана, подверженная давлению пара, 2 см², расстояние середины клапана до точки опоры 3 см. На каком расстоянии от точки опоры нужно поместить подвижной груз 2 кг? Собственный вес клапана и стержня в расчет не принимайте.

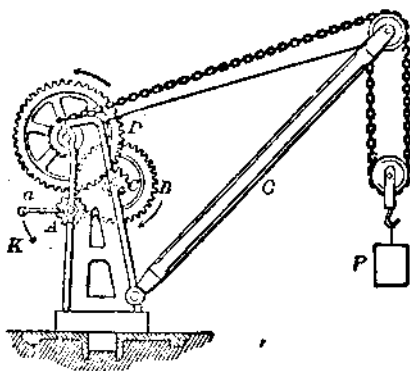


Рис. 99.

104. Докажите, что если взвешивать на весах, длины плеч коромысла которых не одинаковы, два раза, один раз помещая тело на левую чашку, а другой раз на правую, то истинный вес будет равен $\sqrt{P_1 \cdot P_2}$, где P_1 и P_2 — веса, полученные при первом и втором взвешивании.

105. Коэффициент полезного действия неподвижного блока 0,95. Какую силу должен развивать человек, чтобы поднимать груз весом 200 кг?

106. Радиус вала ворота равен 15 см, а радиус круга описываемого рукою, равен 45 см. Какую силу нужно приложить к рукоятке, чтобы поднимать груз весом 75 кг? Коэффициент полезного действия ворота 90%.

107. Найти силу, параллельную длине наклонной плоскости, высота которой 1 м, длина 8 м, чтобы удержать груз весом 1,6 т. Трение в расчет не вводится.

108. Какую силу нужно развивать, чтобы двигать тело по наклонной плоскости предыдущей задачи? Коэффициент трения равен 0,12.

109. Какую силу тяги N должен развивать паровоз, чтобы двигать поезд весом Q при подъеме с уклоном пути i ?

110. Домкрат имеет шаг 0,5 см, длина рукоятки равна 45 см. Найти подъемную силу домкрата, если на рычаг действуют два рабочих с усилием по 15 кг каждый. Коэффициент полезного действия домкрата можно считать 40%.

111. Объясните действие подъемного крана, изображенного на рис. 99.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

ЭНЕРГИЯ

§ 98. Понятие об энергии. Кинетическая энергия. Мы говорим, что тело обладает запасом энергии, если оно способно совершить работу. Если мы отмечаем при этом, что данное тело обладает энергией в 100 кгм, то это значит, что оно может совершить работу в 100 кгм.

Обладает ли энергией движущийся трамвай? Конечно, да. Если вагоновожатый сообщит трамваю некоторую скорость, а затем выключит ток, то далее вагон покатится по инерции; на пути движения он будет преодолевать сопротивления, а следовательно, совершать работу.

В каком случае трамвай сможет проехать по инерции большее расстояние — на горизонтальном пути или при подъеме? Запас энергии, который имел трамвай, в первом случае будет расходоваться только на преодоление сопротивления трения, во втором же — также и на поднятие его вверх.

Не трудно сообразить, что во втором случае трамвай скорее израсходует весь свой запас энергии.

Пуля, вылетевшая из дула ружья, или камень, брошенный рукою человека, также имеют запас энергии, так как во время полета они преодолевают сопротивление воздуха и производят разрушение при ударе.

Движущаяся вода рек и водопадов, движущийся во время ветра воздух также являются носителями энергии — вспомните водяные и ветряные мельницы, которые превращают указанные виды энергии в полезную работу.

Энергия, которой обладает всякое движущееся тело, носит название энергии движения, или кинетической (от греческого слова «кинема», что значит в переводе на русский язык «движение»).

Попробуйте бросить с одинаковой скоростью несколько камней и проследите за произведенными ими разрушениями, вы заметите, что

камни, имевшие большую массу, произвели и более сильное разрушение. Проведая несколько подобных опытов, вы придете к такому выводу: *чем больше масса движущегося тела, тем большую работу оно может совершить*, т. е. тем большим запасом энергии оно обладает.

Вылетевшая из дула ружья пуля производит более значительное разрушение в том случае, если она ударяет в препятствие, имея сравнительно большую скорость движения, — она, например, может, разбить навзлет; в случае же удара в препятствие пули, находящейся на излете, обладающей небольшой скоростью движения, разрушение, причинение ею, будет невелико, рана, нанесенная ею, обычно бывает неглубока.

Множество наблюдений и опытов убеждают нас, что *скорость движения тела влияет на величину работы, которую может это тело произвести*, причем при возрастании скорости движения вдвое, втрое, и т. д. работа соответственно увеличивается в четыре, девять и т. д. раз, т. е. запас кинетической энергии у движущегося тела прямо пропорционален квадрату скорости его движения.

Как мы увидим в дальнейшем, *кинетическая энергия измеряется половиной произведения массы тела на квадрат его скорости движения, т. е.*

$$\frac{1}{2} mv^2.$$

Это произведение носит название *живой силы*.

§ 99. Потенциальная энергия. Продолжим наше изучение различных видов энергии. В мастерской имеется паровой молот. Поднятая вверх баба молота обладает некоторым запасом энергии, так как при своем падении она может совершить работу, равную произведению ее веса на высоту падения. Энергия, которой обладает баба, конечно, совершенно иного типа, чем только-что рассмотренная нами кинетическая.

Баба висит неподвижно — энергия, которой она обладает, является лишь следствием ее приподнятого положения. Эта энергия *скрытая*, или *потенциальная*.

Потенциальную энергию, которой обладает тело, измеряют величиной производимой им работы. Так, если тело, весом P кг, приподнято на высоту h м относительно какого-нибудь условного горизонта, то оно обладает запасом энергии $P h$ кгм относительно этого горизонта.

§ 100. Примеры потенциальной энергии. Приведем еще несколько примеров потенциальной энергии.

Скрученная пружина у ваших карманных часов имеет запас энергии этого рода. Каждый вечер вы заводите ваши часы, т. е. скручиваете их пружину. В течение последующих суток пружина разворачивается, приводя в движение часовой механизм и совершая некоторую работу. Что произойдет, если вы случайно забудете завести ваши часы? Они тотчас же остановятся, как только израсходуют весь запас энергии, заключенной в скрученной пружине.

Вода, находящаяся в лежащем на возвышении озере, также обладает запасом потенциальной энергии. Стекая вниз, она может привести в движение водяные турбины, которые совершат при этом определенную работу.

Поднятая гиря стенных часов, лук с натянутой тетивой, воздух, сжатый в духовом оружьи, также таят в себе запас потенциальной энергии.

Еще пример. Два наэлектризованных или намагниченных тела также обладают энергией этого рода. Если оба они наэлектризованы одноименно (оба положительным электричеством или оба отрицательным), то они отталкиваются друг от друга, при разноименном же заряде (одно тело положительно, а другое отрицательно) они взаимно притягиваются. Сила взаимодействия может привести их в движение, при этом она совершит работу.

§ 101. Уравнение живых сил. Пусть на массу тела m г действует в течение t секунд постоянная сила f дин. Под влиянием этой силы тело в среде без сопротивления будет двигаться равноускоренно, пройдет путь S см и приобретет некоторую скорость v .

Работа силы f на расстоянии S равна fS эргам, но

Рис. 100.

$$f = mc,$$

$$S = \frac{ct^2}{2},$$

откуда

$$fS = \frac{mc^2 t^2}{2}; \quad (*)$$

приобретенная скорость v :

$$v = ct; \quad v^2 = c^2 t^2.$$

Заменяя в равенстве (*) $c^2 t^2$ через v^2 , имеем:

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

т. е. работа силы f на пути S равна приобретенной телом живой силе $\frac{mv^2}{2}$.

Если тело с массой m начало двигаться из точки A (рис. 100) под влиянием постоянной силы f и имело в точке B скорость v_1 , а в точке D — v_2 , то, обозначая расстояние AB через S_1 и AD через S_2 , можно написать:

$$fS_1 = \frac{mv_1^2}{2},$$

$$fS_2 = \frac{mv_2^2}{2},$$

туда

$$fS_2 - fS_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

$$f(S_2 - S_1) = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

меняя $S_2 - S_1$ через S , имеем:

(**)

$$fS = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Работа силы на данном участке пути равна приращению живой силы на этом участке пути. Это равенство носит название уравнения живых сил.

Выведенное нами уравнение живых сил справедливо лишь для движения в среде без сопротивлений, в реальных условиях лишь часть работы fS идет на приобретение живой силы, а часть на преодоление сопротивления, и равенство (**) принимает вид:

$$fS = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} + R,$$

где R — работа, идущая на преодоление сопротивлений.

Примеры: 1. По наклонной плоскости (рис. 101) высотой $H = 20$ см длиной $L = 100$ см движется тело массой 50 г. Какую скорость приобретет оно, дойдя до конца наклонной плоскости? $k = 0,02$.



Рис. 101.

Разложим силу веса тела (P) на составляющие Q и N . Сила Q приведет тело в движение и совершит работу равную: $L = PH = 50 \cdot 20 = 1000 \text{ г}\cdot\text{см} = 981 \text{ 000 эргов}$.

Часть этой работы пойдет на преодоление трения, часть на приобретение живой силы:

$$fS = \frac{mv^2}{2} + R.$$

Работа на преодоление трения (R) равна силе F , идущей на преодоление трения, умноженной на пройденный путь, т. е.

$$R = FL.$$

Но $F = kN$, где N — нормальное давление, а k — коэффициент трения. Из подобия $\triangle ABC$ и OPN имеем:

$$\frac{N}{P} = \frac{AC}{AB}.$$

Вычислим из $\triangle ABC$ катет AC ; он приблизительно равен 98 см.

$$\frac{N}{50} = \frac{98}{100}; N = 49 \text{ г}.$$

отсюда

$$F = k \cdot N = 0,02 \cdot 49 = 0,98 \text{ г},$$

Работа на преодоление силы трения

$$R = F \cdot L = 0,98 \cdot 100 = 98 \text{ гсм} \cong 97\,000 \text{ эргов.}$$

На приобретение живой силы пойдет оставшаяся после преодоления трения работа:

$$981\,000 - 97\,000 = 884\,000 \text{ эргов.}$$

$$\frac{mv^2}{2} = 884\,000,$$

подставляя вместо $m = 50$ г, имеем:

$$\frac{50 \cdot v^2}{2} = 884\,000,$$

откуда

$$v^2 = \frac{884\,000 \cdot 2}{50}; \quad v \cong 188 \text{ см/сек.}$$

2. Какой путь пройдет тело по горизонтальному пути AE , достигнув конца наклонной плоскости (предыдущая задача), если коэффициент трения составляет 0,04?

Тело остановится тогда, когда вся живая сила, которой обладало оно в точке A , будет израсходована на преодоление трения. Назовем пройденный путь через x . Работа на преодоление силы трения на протяжении этого пути будет равна:

$$kRx = 0,04 \cdot 50 \cdot x \text{ гсм} = 1962 \cdot x \text{ эргов.}$$

Живая сила в точке A составляет 884 000 эргов,

$$884\,000 = 1962 \cdot x,$$

откуда

$$x = \frac{884\,000}{1962} \cong 450 \text{ см} = 4,5 \text{ м.}$$

§ 102. Импульс силы и количество движения. Умножая обе части равенства, выражающего собою формулу второго закона Ньютона

$$f = mc$$

на время действия силы (t), получим:

$$ft = met.$$

Но et равно приобретенной скорости v , т. е.

$$ft = mv. \quad (*)$$

Произведение величины силы на время ее действия носит название импульса силы.

Произведение массы тела на скорость его движения называется количеством движения.

Полученная нами формула (*) показывает, что импульс силы равен приобретенному телом количеству движения.

Пусть тело массой m начало двигаться из точки A под влиянием постоянной силы f по направлению AD (рис. 100). В точке B тело имеет скорость v_1 , в точке D — v_2 . Обозначим время действия силы на участке AB через t_1 , на участке AD — через t_2 . В таком случае:

$$ft_1 = mv_1$$

$$ft_2 = mv_2.$$

Вычитая из нижнего равенства верхнее, имеем:

$$f(t_2 - t_1) = mv_2 - mv_1,$$

$$ft = mv_2 - mv_1, \quad (**)$$

где $t = t_2 - t_1$ — время действия силы f на участке BD .

Полученная нами формула (**) показывает, что *импульс силы за некоторый промежуток времени равен изменению количества движения*.

Формулы (*) и (**) широко применяются при решении различного рода задач по механике.

§ 103. Применение технической системы мер. Изучая зависимость, существующую между силой, массой и ускорением, мы до сих пор брали за единицу силы *дин*, а за единицу массы — массу в 1 г, т. е. массу одного см^3 дистиллированной воды при 4°Ц .

Эти единицы, будучи очень малы, не подходят для технических расчетов.

Рассчитаем, например, силу, необходимую для сообщения паровозу весом 80 т ускорения $0,2 \text{ м/сек}^2$.

Так как масса паровоза, выраженная в принятых нами до сих пор единицах, равняется $80 \cdot 1000 \cdot 1000 = 80\,000\,000 \text{ г}$, а ускорение $0,2 \cdot 100 = 20 \text{ см/сек}^2$, то сила, необходимая для сообщения паровозу данного ускорения, выразится так

$$f = mc = 80\,000\,000 \cdot 20 = 1\,600\,000\,000 \text{ дин.}$$

Цифра воистине астрономическая и сверх того мало говорящая о действительной величине силы.

Пользуясь ранее приведенным соображением о том, что динна меньше веса в 1 г в 981 раз, т. е. приблизительно в 1000 раз, переведем динны в тонны.

$$f = \frac{1\,600\,000\,000}{1000 \cdot 1000 \cdot 1000} = 1,6 \text{ т}$$

Заметим, что все приведенные операции крайне неудобны, так как требуют большого внимания при обращении со значительным количеством нулей и немалой траты времени.

Техническая система мер позволяет избежать указанного неудоб-

ства, принимая за единицу силы 1 кг, за единицу массы массу равную 9,81 кг ≈ 10 кг, и за единицу ускорения 1 м/сек².

Тогда предыдущая задача решается легко. Масса паровоза, вес которого 80 000 кг в технических единицах массы будет равна

$$m = \frac{8000}{10} = 8000 \text{ техн. ед. массы.}$$

Сила равна массе умноженной на ускорение, что в единицах технической системы даст нам

$$8000 \cdot 0.2 = 1600 \text{ кг или } 1,6 \text{ т,}$$

т. е. результат тот же, что и полученный ранее.

Решим еще такую задачу.

Какова кинетическая энергия паровоза весом 80 т, движущегося со скоростью 20 м/сек?

Не прибегая к техническим единицам, имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{80000000 \cdot (2000)^2}{2} = 1600000000000 \text{ эрг} = 16 \cdot 10^{12} \text{ эрг.}$$

Снова астрономическая цифра!

Найдем теперь соотношение между эргом и килограммометром.

$$1 \text{ кгм} = 1000 \text{ гм} = 1000 \cdot 100 \text{ г см} = 100000 \cdot 981 \text{ эрг.} \approx 10^8 \text{ эрг.}$$

Таким образом, кинетическая энергия паровоза равна

$$\frac{16 \cdot 10^{12}}{10^8} = 160000 \text{ кгм.}$$

Последнюю цифру можно получить несравненно проще, пользуясь техническими единицами.

Действительно масса паровоза

$$m = \frac{80000}{10} = 8000 \text{ техн. ед. массы.}$$

Следовательно

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{8000 \cdot (20)^2}{2} = 160000 \text{ кгм.}$$

Легко применить техническую систему единиц и в случае центробежной силы.

Пусть, например, требуется вычислить величину центробежной силы для маховика радиусом 1,2 м, весом 600 кг, у которого линейная скорость точки, лежащей на окружности равна 4 м/сек.

$$f = \frac{mv^2}{r} = \frac{60 \cdot 16}{1,2} = 800 \text{ кг.}$$

§ 101. Переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Пусть из точки A (рис 102) свободно падает тело весом p дин. В точке A тело обладало запасом потенциальной энергии относительно поверхности MN равным pH эрг (где H — высота точки A над горизонтом MN , выраженная в см). Кинетическая энергия в точке A была равна нулю. Таким образом, сумма потенциальной и кинетической энергии в точке A :

$$E_A = pH + 0 = pH.$$

Заменяя силу веса p на основании второго закона Ньютона массой тела умноженной на ускорение силы тяжести g ,

имеем

$$p = mg, \\ E_A = mgH.$$

По мере падения станет возрастать скорость тела, а следовательно и его кинетическая энергия. Наоборот, потенциальная энергия будет убывать.

Кинетическая энергия в точке B на расстоянии h см от горизонта MN :

$$E_B^K = \frac{mv^2}{2},$$

где v — скорость тела в точке B .

Из уравнений движения свободно падающего тела имеем

$$v = \sqrt{2gS},$$

где S — путь, пройденный телом; в нашем случае он равен $(H - h)$, т. е.

$$v = \sqrt{2g(H - h)},$$

откуда

$$E_B^K = \frac{mv^2}{2} = \frac{m \cdot 2g(H - h)}{2} = mg(H - h).$$

Запас потенциальной энергии в точке B :

$$E_B^H = mgh.$$

Сумма потенциальной и кинетической энергии в точке B :

$$E_B = E_B^H + E_B^K = mgh + mg(H - h) = mgH,$$

т. е. та же, что и в точке A .

Достигнув поверхности MN в точке C , тело потеряет весь запас потенциальной энергии.

$$E_C^H = 0.$$

Зато скорость в точке C достигнет наибольшего значения

$$v_1 = \sqrt{2gH}.$$

Кинетическая энергия в точке C

$$E_C^K = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m \cdot 2gH}{2} = mgH,$$

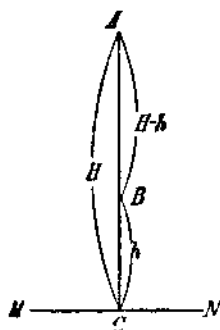


Рис. 102.

откуда
т. е.

$$E_C = 0 + mgH = mgH,$$

$$E_A = E_B = E_C$$

При падении тела его потенциальная энергия постепенно переходит в кинетическую, причем сумма потенциальной и кинетической энергии в любой момент движения является величиной неизменной.

§ 105. Тепловая энергия. *Теплота также является одним из видов энергии, так как ее в свою очередь можно превратить в механическую работу. Паровые машины, работающие на фабриках и заводах, предназначены для превращения тепловой энергии, которая выделяется при сгорании топлива, в энергию движения, а следовательно и в механическую работу.*

С получением тепла в результате механической работы человечество было знакомо с давних времен. Всем известно, что от трения колесной втулки об ось колеса в плохо смазанных повозках оси сильно нагреваются и даже иногда начинают гореть; пила нагревается при продолжительной пилке дров; высекание искр с помощью огнива происходит вследствие отделения при ударе тонких железных стружек и нагревания их при этом от трения до температуры плавления.

Еще в очень отдаленные времена люди добывали огонь, растирая одна о другой куски дерева, да и в настоящее время малокультурные народы пользуются этим примитивным способом добычи огня. Так, эскимосы для этой цели быстро вращают деревянную палочку, вставленную в углубление на деревянной дощечке, а малайцы прибегают к трению двух щепок.

§ 106. Энергия электрического тока и лучистая энергия. Электричество является одним из видов энергии. Вспомните хотя бы электрический трамвай, в котором электрическая энергия превращается в энергию движения.

Электрическая лампочка испускает световые и тепловые лучи, являясь источником *лучистой энергии*.

Но откуда появилась энергия электрического тока?

В топке парового котла на электрической станции сжигается топливо; полученная при этом тепловая энергия расходуется частью полезно на приведение в действие парового двигателя, частью бесполезно теряется на нагревание окружающего воздуха. Паровой двигатель заставляет работать динамомашину, которая и превращает энергию движения в электрическую.

Итак, лучистая энергия электрической лампочки появилась за счет тепловой энергии сжженного на электрической станции каменного угля.

§ 107. Химическая энергия. За счет какой энергии выделяют тепло каменный уголь, дрова, нефть и другие виды топлива?

При горении происходит процесс соединения горящего вещества с кислородом воздуха, причем выделяется вполне определенное количество тепла. Не трудно сделать заключение, что в горючем веществе и кислороде воздуха содержится некоторый запас химической энергии, часть которой расходуется при выделении тепла.

Для получения электрического тока иногда пользуются так называемыми гальваническими элементами. В них происходит химическая реакция, часть расходуемой при этом химической энергии веществ, входящих в состав элементов, превращается в энергию электрического тока.

Обратно, пропуская электрический ток через растворы некоторых сложных веществ, можно производить химические реакции, т. е. в этом случае, наоборот, энергия электрического тока переходит в химическую.

§ 108. Сохранение энергии. Мы уже отмечали, что различные виды энергии способны преобразовываться; так, при падении тел потенциальная энергия превращается в кинетическую, эта последняя при ударе переходит в тепло и т. д.

Постоянные наблюдения над переходом энергии из одного вида в другой, показавшие невозможность получения выигрыша в работе, множество бесплодных попыток создать «вечный двигатель», который бы работал сам собою без какой-либо затраты энергии, — все это привело людей к заключению, что *энергия в природе не исчезает и не создается из ничего, а только переходит из одного вида в другой.*

Это положение носит название *закона сохранения энергии* и является основным и важнейшим законом естествознания.

§ 109. Вопросы и задачи. 112. Обладает ли энергией звучащее тело?

113. Чему равна живая сила тела массой 2 кг, имеющего скорость 3 м/сек?

114. Какой путь пройдет тело предыдущей задачи по горизонтальному пути, если коэффициент трения равен 0,1?

115. Поезд весом в 1000 т идет по горизонтальному пути со скоростью 60 км/час. Какой путь пройдет он по прекращении работы машины, если коэффициент тяги равен 0,05?

116. Снаряд весом в 20 кг имеет скорость 250 м/сек и входит в земляной вал на глубину 1 м. Определить среднюю величину силы, задерживающей движение снаряда.

117. Определите запас кинетической энергии у товарного поезда весом 1200 т движущегося со скоростью 20 км/час, применяя единицы технической системы.

118. С какой скоростью движется снаряд весом 0,5 т, если он обладает кинетической энергией 250 000 жм.

119. Определите скорость вращения тела весом 20 кг, если величина центростремительной силы 4 кг, а радиус описываемой им окружности 2 м. Расчет ведите в единицах технической системы.

§ 110. Вопросы и задачи для повторения всего отдела. 120. Что такое движение? Какое движение называется сложным?

121. Как читается закон инерции? Приведите примеры инерции.

122. Какое движение называется равномерным. Что такое скорость при равномерном движении?

123. С какой скоростью летит пуля, если она в течение 4 сек пролетела расстояние 450 м?

124. Что такое сила? Чем характеризуется сила? Как графически изображается сила?

125. Что называется равнодействующей данных сил?

126. В чем состоит правило параллелограмма и многоугольника сил?

127. Найдите равнодействующую двух взаимно перпендикулярных сил в 3 кг и 4 кг, приложенных к одной точке.

128. Как найти равнодействующую двух параллельных сил, направленных в одну или разные стороны? Что такое пара сил?

129. Доска толщиной 4 см и шириною 25 см имеет длину 5 м. Какое давление передает она на опоры, если удельный вес дерева равен $0,75 \text{ г/см}^3$?

130. На этой доске лежит груз в 100 кг на расстоянии 2 м от левой опоры. Найти давление от груза на опоры.

131. Найти равнодействующую двух параллельных сил в 10 кг и 30 кг, если расстояние между ними 100 см.

132. Что такое момент силы? Какие моменты носят название положительных и какие отрицательных? Докажите, что момент равнодействующей силы равен сумме моментов сил составляющих.

133. Какое движение называется равноускоренным? Что такое ускорение? Выведите формулы равноускоренного и равнозамедленного движения.

134. Найти путь, который проходит тело, движущееся равноускоренно за 10 сек, если начальная скорость $V_0 = 10 \text{ см/сек}$, а ускорение $a = 4 \text{ см/сек}^2$.

135. Нарисуйте графики движений.

136. Что такое диня? Какова связь между силой, массой и ускорением?

137. Как читается закон всемирного тяготения Ньютона?

138. Как происходит падение тел в пустоте? Чему равно ускорение падающих тел?

139. Как движется тело, брошенное отвесно вверх?

140. Сколько времени падает тело с вершины Эйфелевой башни в Париже, высота которой 300 м?

141. С какой высоты упало на землю тело, если оно падало в течение 5 сек?

142. Два тела падают вниз из одной точки, одно через две секунды после другого. Какое расстояние будет между ними через 10 сек после начала падения второго тела?

143. Паровоз, отходя от станции, двигается в течение первой минуты равноускоренно и проходит путь, равный 450 м. Определить ускорение и приобретенную скорость.

144. Снизу вверх брошено тело с начальной скоростью $V_0 = 60 \text{ м/сек}$. Через сколько времени оно достигнет высоты 100 м?

145. Какую силу нужно приложить к телу массой 20 г, чтобы оно получило ускорение 10 см/сек^2 ?

146. Что такое центр тяжести и как он находится опытным путем?

147. В чем состоит закон равенства действия и противодействия?

148. Разберите случаи равновесия тел подпертых в одной точке.

149. Что такое опорная поверхность? Разберите случаи равновесия тела, имеющего опорную поверхность. Что такой предельный угол устойчивости тела?

150. В чем состоит закон независимости действия сил?

151. Разберите сложение двух равномерных и прямолинейных движений?

152. Как движется тело, брошенное горизонтально?

153. С крыши дома в горизонтальном направлении брошен камень с начальной скоростью $V_0 = 20 \text{ м/сек}$. Через 3 сек он упал на землю. Определить: 1) высоту здания, 2) на каком расстоянии от здания упал камень.

154. Что такое угловая скорость? Как связана угловая скорость с линейной?

155. Какие силы называются центростремительной и центробежной? Какова величина этих сил?

156. Как устроена центробежная машина? Что такое сепараторы? Как устроены центробежные регуляторы?

157. С какой скоростью вращается камень весом 12 г, если центробежная сила равна 24 г, а длина веревки 25 см?

158. Что такое работа и как она измеряется? Что такое эрг и джоуль?

159. Что такое мощность? Чему равна лошадиная сила?

160. Лебедка развивает мощность 10 л. с. поднимая груз весом 15 т. На какую высоту поднимет она этот груз за 2,5 мин?

161. Какую мощность развивает лебедка, поднимая камень размерами $2 \times 1,5 \times 0,8 \text{ м}$ на высоту 10 м в течение 3 мин 20 сек? Удельный вес камня $2,5 \text{ т/м}^3$.

162. Что такое коэффициент трения?

163. Что называется рычагом? Какие рычаги именуются рычагами 1-го и 2-го

рода? Условие равновесия рычага? Объясните устройство блоков, ворота и зубчатых колес. Что такое коэффициент полезного действия этих машин?

164. Человек тянет санки, развивая мощность 0,12 л. с. На какое расстояние он передвинет их за 1 мин, если вес санок 270 кг, а коэффициент трения 0,02?

165. Какую силу нужно приложить к концу рычага длиной 2,25 м, подпертого на расстоянии 0,25 м от точки приложения груза, чтобы удержать груз весом 400 кг?

166. Коэффициент полезного действия подвижного блока 90%. Какую силу нужно развивать, чтоб поднимать груз весом 180 кг?

167. Какой груз можно поднимать при помощи ворота, коэффициент полезного действия которого 85%, развивая усилие в 40 кг, если радиус вала 10 см, а радиус, описываемый рукою, 50 см?

168. Как происходит движение тела по наклонной плоскости?

169. Объясните устройство винта и клина?

170. Длина наклонной плоскости 2 м. Какую высоту она должна иметь, чтобы можно было удержать на ней груз весом в 160 кг силой в 32 кг, действующей параллельно длине наклонной плоскости?

171. Какую силу нужно дополнительно приложить, чтобы перемещать тело предыдущей задачи вверх по наклонной плоскости при коэффициенте трения, равном 0,08?

172. Что такое энергия? Какая энергия называется кинетической и какая потенциальной? Приведите примеры той и другой. В чем состоит закон сохранения энергии?

173. Что такое живая сила?

174. В чем состоит система технических единиц?

175. Тело весом 10 кг поднято на высоту 5 м. Докажите, что запас потенциальной энергии у этого тела равен той кинетической энергии, которой он будет обладать при падении на землю. Расчет ведите в единицах технической системы.

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

ЖИДКОСТИ, ГАЗЫ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.

§ 111. Сходство и различие между жидкостями и газами. В чем сходство между жидкостями и газами? — И те и другие обладают удобоподвижностью частиц, вследствие чего не имеют какой-либо своей определенной формы, принимая форму того сосуда, в котором находятся. Газы, кроме того, не обладают определенным объемом, отличаясь способностью безгранично расширяться и в значительной степени сжиматься. Этим они отличаются от жидкостей, коим присущ вполне определенный объем, ничтожно мало изменяющийся при изменении давления.

Если вода в стакане имеет некоторый определенный объем, то, когда ее перельют в чашку, она хотя и примет форму этой чашки, но зато сохранит свой прежний объем, тогда как газ всегда занимает весь предоставленный ему объем.

Вдвигая поршень в стеклянную трубу, сделанную из толстого стекла, мы легко уменьшаем объем находящегося там воздуха. Если же мы наполним трубку водою и произведем сильное давление на поршень, то даже не заметим сжатия воды. Жидкости очень мало сжимаемы.

§ 112. Передача давления жидкостями и газами. На рис. 103 изображены два сообщающиеся сосуда *A* и *B* цилиндрической формы,

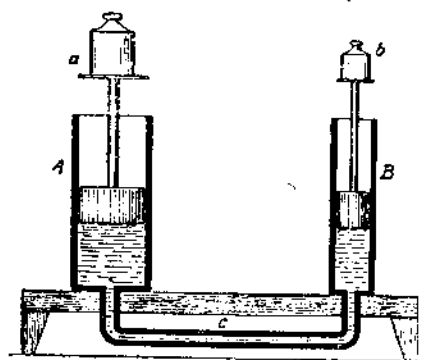


Рис. 103.

наполненные какой-либо жидкостью. Площади сечения этих сосудов различны и равны, хотя бы, 20 см^2 и 5 см^2 . Вставим в эти сосуды поршни и положим на меньший из них некоторый груз *b*, например, 1 кг. Поршень будет давить на жидкость в сосуде *B*. Частицы жидкости, непосредственно находящиеся под поршнем, будут стремиться опуститься вниз, а следовательно, раздвинуть частицы, расположенные под ними, эти последние будут вталкиваться между частицами следующего ряда и т. д. (рис. 104).

Таким образом, давление, произведенное на поршень, передается не только вниз, но также в сторону и вверх.

На каждый квадратный сантиметр поверхности воды под поршнем давление равно $\frac{1}{5}$ кг, такое давление будут испытывать стенки обоих сосудов, а также и поршень в сосуде А. Так как площадь поршня в сосуде А равна 20 см^2 , то, чтобы удержать его на месте, необходимо будет положить гирию a в $\frac{1}{5} \times 20 = 4 \text{ кг}$.

Таким образом, сравнительно небольшой груз в 1 кг уравновешивает груз в 4 кг. Если же на маленький поршень произвести дополнительное давление, например, добавить гирию, то равновесие уже не будет иметь места, и поршень в сосуде А начнет подниматься вверх. Этим движением можно воспользоваться для прессования сена, бумаги, выжимания сока из семян и подобных целей. Небольшая сила, приложенная к маленькому поршню, может заставить подняться и прижиматься к неподвижной преграде тяжелый груз, помещенный на поршне в широком цилиндре.

Конечно, выигрыш в силе компенсируется проигрышем в пройденном пути. Если не принимать во внимание трения, то работа, произведенная небольшим грузом в сосуде В, равна работе, затраченной на подъем тяжелого груза в сосуде А.

Обозначим через P силу, приложенную к меньшему поршню с площадью $m \text{ см}^2$, а через Q вес груза, поднимаемого поршнем с площадью $n \text{ см}^2$.

Условия равновесия:

$$\frac{P}{m} = \frac{Q}{n},$$

или

$$P : Q = m : n. \quad (*)$$

Пусть груз P опустился на расстояние $h \text{ см}$, тогда объем жидкости, притекшей в сосуд А, равен $mh \text{ см}^3$, что вызовет поднятие поршня и груза в этом сосуде на $h_1 = \frac{mh}{n} \text{ см}$, откуда

$$\frac{h_1}{h} = \frac{m}{n}. \quad (**)$$

Сравнивая равенство (*) с равенством (**), имеем

$$\frac{P}{Q} = \frac{h_1}{h},$$

следовательно, $Ph = Qh_1$, т. е. работа силы P равняется работе силы Q .



Рис. 104.

На рис. 105 изображен цилиндр, в который вставлен поршень. Цилиндр оканчивается шаром с небольшими отверстиями в стенках. Если наполнить прибор водою и производить давление на поршень, то можно заметить, что струя воды вырывается перпендикулярно поверхности шара. Этот опыт приводит нас к заключению, что давление, произведенное на жидкость в замкнутом сосуде, передается во все стороны *перпендикулярно стенкам этого сосуда*. К такому же выводу можно прийти следующим рассуждением. Предположим, что давление P направлено под углом к стенке сосуда (рис. 106). Разложим силу P на две: одну, перпендикулярную стенке сосуда MN (P'), и другую параллельную ей (P''). Первая уничтожится сопротивлением стенки, тогда как вторая должна будет привести жидкость в движение вдоль стенок сосуда; на самом же деле жидкость находится в покое, следовательно, наше предположение ошибочно, и сила P действует не под углом, а перпендикулярно стенке.

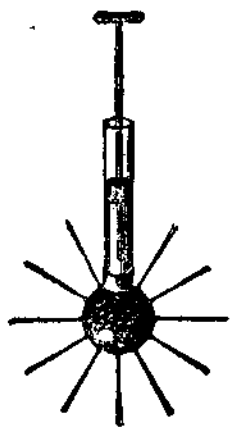


Рис. 105.

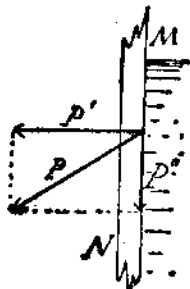


Рис. 106.

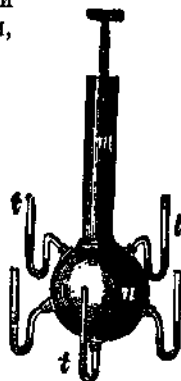


Рис. 107.

Итак, давление, произведенное на жидкость, находящуюся в замкнутом сосуде, передается во все стороны равномерно, с силой, перпендикулярной стенкам и пропорциональной их площади.

Это положение было впервые установлено французским ученым Паскалем и известно под названием закона Паскаля.

Закон Паскаля применим и к газам.

Если к отверстиям шарика n прибора, которым мы только-что пользовались, приделать ряд изогнутых трубок t и налить в каждую из них немного ртути, как это показано на рис. 107, а затем пронавести давление на поршень, то воздух в шарике сожмется и ртуть поднимется во всех трубках на одинаковую высоту.

§ 113. Давление жидкости на дно и стенки сосуда. В конце XVIII и на протяжении всего XIX века было произведено множество попыток постройки подводных лодок, причем большинство опытов оканчивалось неудачно. Так, в 1772 году произошла катастрофа с подводной лодкой, построенной англичанином Дэй, причем сам изобретатель и весь экипаж погибли в водной пучине, а в 1872 году при опытах Гальштета погибло также 40 человек. Чем же объясняются эти

варии? При опускании подводных судов давление окружающей воды быстро возрастает и достигает значительной величины. Изобретатели не учитывали достаточно точно этого давления, и их подводные суда гибли, раздавленные напором воды.

Выясним сначала, каково давление жидкости на дно сосуда, а затем и на погруженное в нее тело.

Предположим, мы имеем сосуд (рис. 108) с вертикальными стенками. Верхний слой налитой в него жидкости давит на нижележащий, тот передает давление следующему и т. д. Дно сосуда испытывает давление от веса всего расположенного над ним столба жидкости.

Обозначим высоту столба жидкости через H см, площадь дна сосуда через S см², тогда объем вертикального столба жидкости над дном сосуда равен $v = HS$ см³.

Вес этого столба P равен произведению его объема v на удельный вес жидкости d , т. е.

$$P = HSd \text{ г.}$$

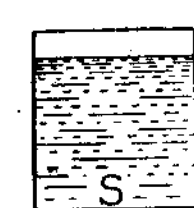


Рис. 108.

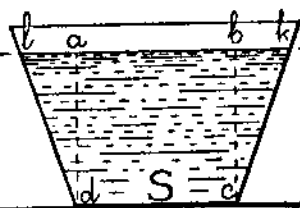


Рис. 109.

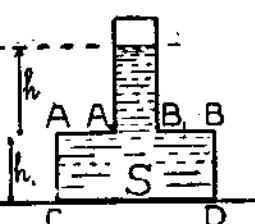


Рис. 110.

Предположим теперь, что мы имеем сосуд, изображенный на рис. 109. Стенки этого сосуда расширяются в верхней части, и на дно производит давление только столб $abcd$, давление которого так же, как и в предыдущем случае, равно $P = HSd$ г.

Давление же частей жидкости lad и bkc передается боковым стенкам сосуда.

Возьмем теперь сосуд, верхняя часть которого значительно уже нижней, и напомним его жидкостью до высоты H (рис. 110). На уровне AB жидкость испытывает давление, равное весу ее столба высотой h см; по закону Паскаля это давление передается во все стороны равномерно; следовательно все стенки нижней части сосуда испытывают такое же давление, какое произвел бы груз P , равный весу столба жидкости высотой h см и площадью сечения, равной площади сечения сосуда в части A_1B_1 . Дно сосуда также испытывает это давление столба жидкости $ABCD$ высотой h_1 см. Полное давление жидкости на дно сосуда будет следовательно измеряться весом столба жидкости $BACD$,

$$P_1 = Sh_1d,$$

где S — площадь дна сосуда, а d — удельный вес жидкости, плюс давление от груза P , равное давлению столба жидкости высотой h см,

$$P_2 = Shd.$$

Полное давление жидкости на дно сосуда

$$P = Sh_1d + Shd = Sd(h_1 + h) = SdH.$$

Итак, давление жидкости на дно сосуда, независимо от его формы, равно весу ее вертикального столба, основание которого

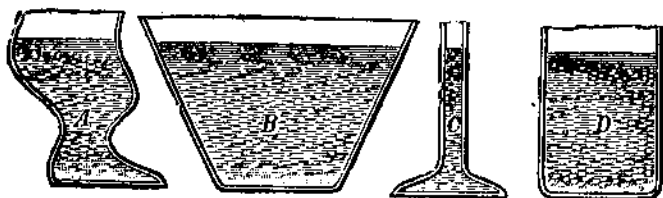


Рис. 111.

равно площади дна, а высота соответствует высоте жидкости в сосуде.

На первый взгляд это положение вызывает сомнение. Трудно поверить, например, что сосуды *A*, *B*, *C* и *D*, обладающие одинаковой площадью дна, испытывали при одинаковых уровнях жидкости равные давления на дно (рис. 111).

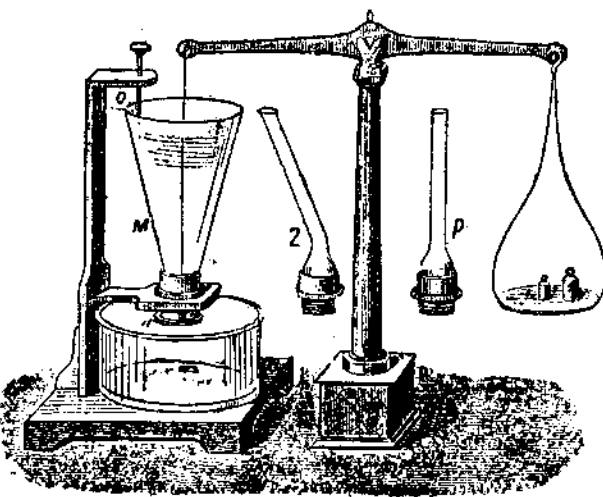


Рис. 112.

Прибор, изображенный на рис. 112, дает возможность подтвердить правильность этого положения на опыте. Груз, положенный на правую чашку весов прижимает пластинку *a* к основанию прикреплённых к стойке сосудов без дна *M*, *Z*, *P*. При одинаковой площади дна этих сосудов указанный груз сможет удержать давле-

ние равных по высоте столбов одной и той же жидкости несмотря на различную форму сосудов.

Учащиеся часто склонны смешивать совершенно различные понятия — давление жидкости на дно сосуда и вес жидкости в сосуде.

Рассмотрим сосуды, изображенные на рис. 109 и 110. В сосуде, расширяющемся кверху (рис. 109), часть воды *lad* и *bkc* производит давление на боковые стенки, как бы их прижимая книзу, в сосуде же, сужающемся в верхней части, стенки *AA* и *BB*, испытывают давление, направленное вверх, которое стремится приподнять сосуд кверху.

Чтобы убедиться в этом на опыте, возьмите два сосуда без дна, из коих один расширяется, а другой сужается кверху, поставьте их на стол и налейте воду. В сосуде, расширяющемся кверху, давление воды на боковые стенки плотно прижмет его к столу и вода не выльется, в сужающемся кверху сосуде вода, наоборот, будет стремиться приподнять его и, вследствие этого, начнет вытекать.

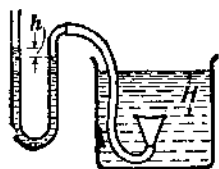


Рис. 113.

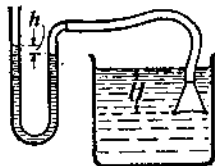


Рис. 114.

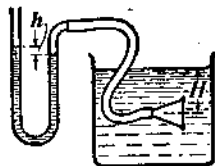


Рис. 115.

Чтобы выяснить вопрос о давлении жидкости на стенки сосуда, воспользуемся прибором, изображенным на рис. 113. В сосуд с жидкостью погружается стеклянная трубка, конец которой посредством каучуковой трубки соединен с воронкой, отверстие которой затянуто тонкой резиной. Другой конец трубки соединен с U-образной трубкой, в оба колена которой налита подкрашенная вода. Чем глубже погружать в жидкость сосуда воронку, тем сильнее на затянутое резиной ее отверстие будет давить жидкость, резина станет прогибаться и сжимать находящийся внутри воронки и трубки воздух, вследствие чего уровень подкрашенной воды в левом колене U-образной трубки станет опускаться, а в правом, наоборот, подниматься. Заметим разность высот уровней воды, соответствующую погружению основания воронки на глубину H .

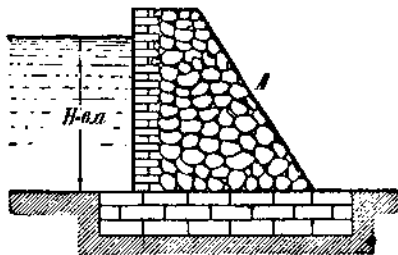


Рис. 116

Если повернуть затем воронку так, как показано на рис. 114, то при погружении ее основания вновь на глубину H давление жидкости будет такое же, как и в первом случае, т. е. разность высот воды в коленях U-образной трубки мы отметим ту же, что и в первом опыте. Следовательно, на глубине H давление жидкости на некоторую площадку снизу вверх то же, что и сверху вниз.

Если расположить воронку так, чтобы жидкость давила на нее сбоку (рис. 115), то при погружении середины ее основания на глубину H мы вновь отметим разность подкрашенной воды в коленях трубки такую же, что и в первых двух случаях.

Пусть площадь основания воронки равна $S \text{ см}^2$, глубина ее погружения $H \text{ см}$, а удельный вес жидкости d , тогда при всех трех опытах давлению на нее будет такое же, как и в первом опыте, т. е. $P = SHd \text{ г}$.

Отсюда легко прийти к заключению, что *давление жидкости (в граммах) на боковую стенку равно произведению площади*

этой стенки (в квадратных сантиметрах) на глубину погружения ее середины (в сантиметрах) и на удельный вес жидкости.

Решим задачу. Требуется определить, какое давление со стороны воды испытывает стенка плотины А (рис. 116) на протяжении 10 м, если высота воды в плотине 6 м.

Подвергающаяся давлению площадь $S = 10 \times 6 = 60 \text{ м}^2$.

$$H = \frac{6}{2} = 3 \text{ м.}$$

Удельный вес воды $d = 1 \text{ т/м}^3$.

В таком случае давление P будет равно

$$60 \times 3 \times 1 = 180 \text{ т.}$$

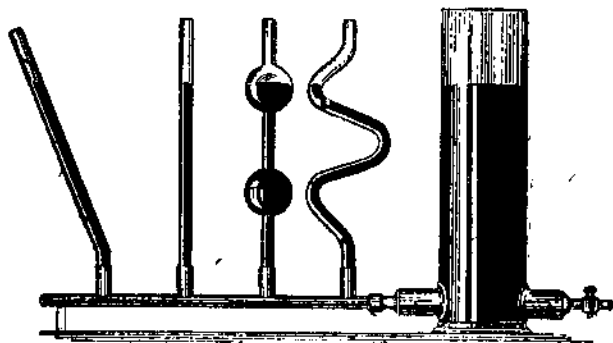


Рис. 117.

§ 114. Сообщающиеся сосуды. Возьмите несколько сообщающихся сосудов и наполните их какой-нибудь жидкостью — вы заметите, что она установится во всех сосудах на одинаковом уровне (рис. 117). К такому же выводу легко прийти и путем несложного рассуждения.

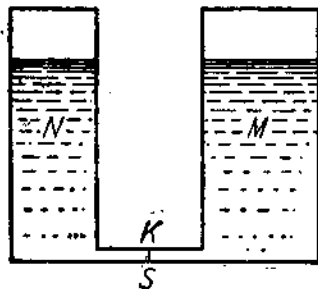


Рис. 118.

В трубке K , соединяющей сосуды M и N (рис. 118), выделим небольшую площадку поверхностью S . Жидкость, находящаяся в левом сосуде (N), давит на эту площадку с силой $P_1 = Sh_1d$, где h_1 — глубина погружения середины этой площадки, а d — удельный вес жидкости.

Аналогично, давление справа $P_2 = Sh_2d$, где h_2 — глубина погружения середины площадки S относительно уровня жидкости в правом сосуде.

Если жидкость находится в равновесии, то давления на площадку S справа и слева должны быть равны (в противном случае жидкость будет перетекать в сторону, где меньше давление, до тех пор, пока не установится равенство давлений):

$$P_1 = P_2;$$

$$Sh_1d = Sh_2d,$$

откуда

$$h_1 = h_2.$$

т. е. в сообщающихся сосудах однородная жидкость, находящаяся в равновесии, стоит на одной высоте.

На принципе равновесия однородной жидкости в сообщающихся сосудах основано устройство водопроводов простейшего типа (рис. 119).

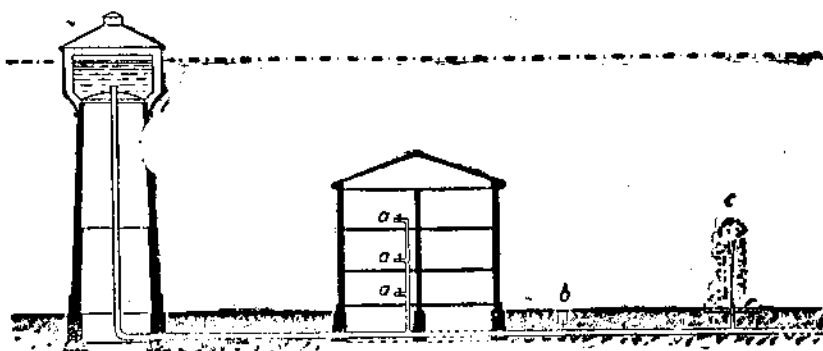


Рис. 119.

В бак или бассейн, расположенный выше окружающих зданий, накачивается вода, которая затем по трубам проводится до верхних этажей домов. Бассейн и поднимающиеся вверх трубы в отдельных зданиях представляют собой систему сообщающихся сосудов, в которых вода стремится стоять на одинаковой высоте.

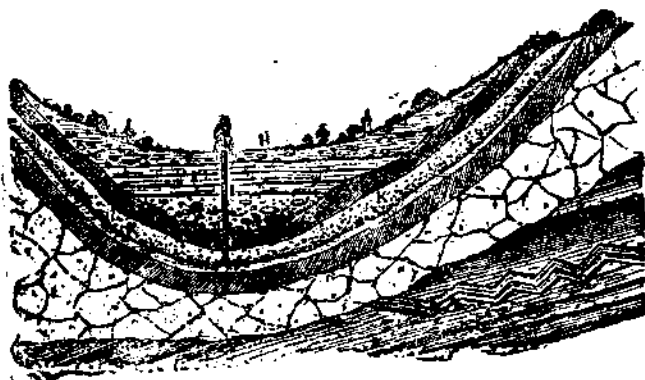


Рис. 120.

Если в одной из труб, идущих из бассейна, сделать небольшое отверстие, то вода из него будет бить *фонтаном*, стремясь достичь той высоты, которую она имеет в бассейне.

В некоторых местностях фонтан можно получить, произведя в почве достаточно глубокую скважину. Может случиться, что дождевая вода, просачиваясь сквозь верхний слой почвы, попадет между двумя слоями глины или другого водонепроницаемого грунта.

Если сделать скважину в верхнем водонепроницаемом слое, в месте, расположенном в низине, то вода будет бить из скважины фонтаном, стремясь достичь уровня, который она имеет в соседних более высоких местах. Источники подобного рода получили название *артезианских колодцев* (рис. 120).

Возьмите теперь два сообщающихся сосуда (рис. 121) и наполните их ртутью, которая, конечно, будет стоять на одной высоте. Затем в один из сосудов, например, в правый, начните приливать воду, — уровень ртути в нем станет несколько опускаться, в левом же сосуде ртуть, наоборот, будет подниматься. Когда жидкости установятся в равновесии, измерьте высоту воды в правом сосуде и высоту ртути в левом сосуде (на сколько она выше, чем в правом). Предположим, вы налили столб воды высотой $h_1 = 27,2$ см, когда же вы измеряли высоту столба ртути, то она оказалась равной $h_2 = 2$ см.

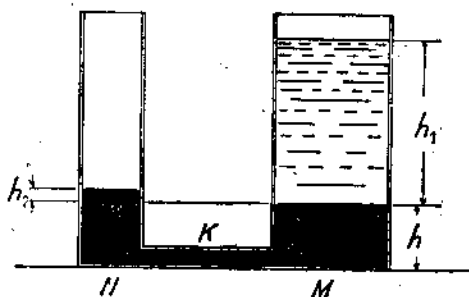


Рис. 121.

Высота воды больше, чем высота ртути, в $27,2 : 2 = 13,6$ раз, т. е. во столько раз, во сколько удельный вес ртути больше удельного веса воды.

Продолжав несколько подобных опытов, мы приходим к заключению, что *высоты разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональны их удельным весам.*

Не трудно подтвердить правильность этого заключения и путем рассуждения.

Выделим небольшую площадку S в трубке, соединяющей сосуды. Давление на нее справа измеряется весом столба ртути высотой h см плюс вес столба воды высотой h_1 см; аналогично давление слева представляет собою вес столба ртути высотой в $h + h_2$ см.

Если жидкости в сосудах находятся в равновесии, то давление на нашу площадку справа равно давлению на нее слева, т. е. вес столба ртути высотой h см плюс вес столба воды высотой h_1 см равен весу столба ртути высотой h см плюс вес столба ртути высотой h_2 см; следовательно вес столба воды высотой h_1 см равен весу столба ртути высотой h_2 см, или

$$Sh_1d_1 = Sh_2d_2,$$

где S — величина поверхности выделенной нами площадки, d_1 и d_2 — соответственно удельные веса воды и ртути.

Из равенства

$$h_1d_1 = h_2d_2$$

составляем пропорцию:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{d_2}{d_1},$$

что вполне соответствует заключению, сделанному нами ранее лишь на основании опытов.

§ 115. Вопросы и задачи. 176. Какое давление испытывает водолаз на каждый квадратный сантиметр поверхности своей одежды при погружении на глубину 20 м?

177. На какую глубину нужно погрузиться в воду, чтобы давление воды достигло 800 г/см^2 ?

178. Определите давление ртути на прямоугольное дно сосуда со сторонами $10 \text{ см} \times 5 \text{ см}$, если ртуть налита на высоту 8 см .

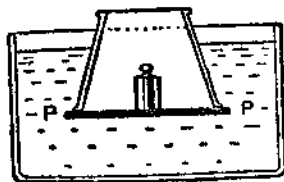


Рис. 122.



Рис. 123

179. Какое давление испытывают боковые стенки сосуда в предыдущей задаче?

180. Диаметр малого поршня сообщающихся сосудов, изображенных на рисунке 103, равен 10 см . Поршень нагружен грузом в 60 кг и дает давление в 540 кг на площадь большого поршня. Найти диаметр большого поршня.

181. Керосин производит давление на дно бака 104 г/см^2 . До какой высоты налит керосин? Удельный вес керосина $0,82 \text{ г/см}^3$.

182. Сосуд без дна (рис. 122) погружается в резервуар с водой. Нижнее основание его закрыто пластинкой $РР$. С какой силой прижимает вода эту пластинку, если площадь основания этого сосуда $S = 100 \text{ см}^2$, а глубина погружения 25 см ? Собственным весом пластинки можно пренебрегать.



Рис. 124.

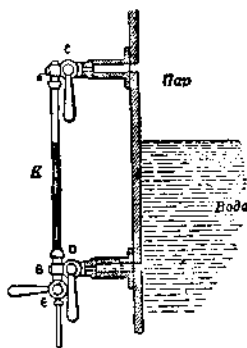


Рис. 125.



Рис. 126.

183. Какой груз нужно положить на пластинку внутри сосуда предыдущей задачи, чтобы пластинка оторвалась?

184. Если внутри сосуда задачи 182 налить масло (уд. вес. $0,9 \text{ г/см}^3$), то какой высоты столб масла придется налить, чтобы пластинка $РР$ оторвалась?

185. В одном колене сообщающихся сосудов, в нижней части которых налита ртуть, находится столб воды высотой 46 см . В другом колене налита испытываемая жидкость, высота столба которой 50 см . Определить удельный вес жидкости.

186. В одном колене сообщающихся сосудов находится масло, удельный вес которого $0,9 \text{ г/см}^3$. В другом колене спирт, удельный вес которого $0,81 \text{ г/см}^3$. Высота столба масла 90 см . Определить высоту столба спирта.

187. Почему плотина, изображенная на рис. 116, расширяется книзу?

188. Для перевода судов из одного участка реки в другой с различными горизонтами воды пользуются шлюзами.

Пусть нужно перевести судно из участка реки *A*, с высоким горизонтом воды, в участок *B*, где горизонт значительно ниже (рис. 123). Когда судно подходит к шлюзовым воротам № 1, последние открываются, и судно свободно входит в камеру, где уровень воды такой же, как и в верхнем участке. Как только судно вошло в камеру, ворота № 1' плотно закрывают и открывают особые отверстия, через которые вода из камеры постепенно вытекает в нижний участок, пока уровень воды в ней не сравняется с горизонтом в этом участке. Тогда тотчас же открывают ворота № 2, и судно переходит в нижний участок *B*. Объясните, как следует поступить, чтобы перевести судно из участка реки *B* в участок *A*.

189. Если в боковой стенке прямоугольного сосуда сделать отверстие, через которое может вытекать вода, одинаковое ли будет давление воды на стенку сосуда с отверстием и на противоположную стенку без отверстия?

190. Объясните принцип полета ракеты. Внутри цилиндра *A* сгорает горючее, продукты сгорания могут выходить только через отверстие *B* (рис. 124).

191. На рис. 125 изображено водомерное стекло, которым пользуются для определения уровня воды в паровом котле. Посредством крапа *B* трубка *K* соединяется с частью котла, где находится вода, край *C* соединяет ее с частью котла, заполненной паром. Каков будет уровень воды в трубке, если крапы *C* и *D* одновременно открыты? Будет ли одинаков уровень воды в трубке *K* и котле, если край *C* закрыт, а давление пара в котле изменилось?

192. В U-образную трубку, изображенную на рис. 126, над поверхностью ртути справа налили испытываемую жидкость. Ее высота $h_1 = 15$ см. Высота ртути слева $h_2 = 1$ см. Найти удельный вес жидкости.

193. На сколько сантиметров изменится высота столба ртути h_2 в предыдущей задаче, если над поверхностью жидкости в правом колене будет налит еще столб спирта (удельный вес = 0,8) высотой в 10 см?

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ.

ДАВЛЕНИЕ АТМОСФЕРЫ.

§ 116. Атмосфера. Когда окружающий нас воздух неподвижен, мы не замечаем его присутствия, однако, убедиться в существовании воздуха очень просто — стоит резко взмахнуть рукой около лица, и мы почувствуем его движение. Слой воздуха, окружающий Землю, носит название *атмосферы*.

Многочисленные факты заставляют нас прийти к заключению, что толщина атмосферы не менее 400 км, впрочем резкой границы атмосферы указать нельзя, так как по мере поднятия вверх воздух делается все реже и постепенно как бы сходит на нет.

§ 117. Давление атмосферы. Прodelайте сами такой опыт. Возьмите перегоревшую электрическую лампочку и взвесьте ее на чувствительных весах. Затем, завернув лампочку в тряпку и осторожно проведя напильником царяину, отломайте ее кончик. Воздух, удаленный насосом при ее изготовлении, вновь ворвется в лампочку. Произведя вторичное взвешивание, (причем надо взвесить и отрезанный кончик), вы заметите увеличение веса. Более точные опыты устанавливают, что *1 м³ воздуха на поверхности Земли в среднем при обычных условиях весит приблизительно 1,3 кг*. Так как 1 м³ воды весит 1000 кг (1 тонну), то отсюда легко сделать вывод, что *воздух приблизительно в 770 раз легче воды*.

Следствием весомости воздуха является его давление на поверхность Земли.

Как доказать существование атмосферного давления? Возьмите стакан, наполните его до краев водою, к поверхности воды плотно прижмите лист бумаги и, придерживая его рукой, переверните стакан (рис. 127). Если вы затем отнимете руку, то вода из стакана не выльется. Чем же это можно объяснить, ведь сила веса воды тянет ее книзу, что же не дает воде вылиться? Давление воздуха.



Рис. 127.

Нижние слои воздуха под давлением верхних сжаты, благодаря удобоподвижности частиц воздуха это давление передается не только вниз, но и во все стороны (закон Паскаля). Таким образом, давление воздуха плотно прижимает бумагу к стакану и не дает воде вылиться из него. Из этого опыта легко сделать вывод: давление воздуха на поверхность бумаги снизу вверх больше давления воды сверху вниз.

Проделайте еще опыт с перегоревшей электрической лампочкой; опустите ее в сосуд с водою и осторожно отломите ее кончик, предварительно нанеся напильником царапину на стекле. Вы заметите, как вода устремится через отверстие внутрь лампочки и вскоре заполнит почти все пространство внутри нее. Если вы несколько выдвинете лампочку из воды, она все равно будет продолжать поступать. Что же гонит воду внутрь лампочки? Давление атмосферы.

Внутри лампочки воздух выкачан, снаружи же на поверхность воды давит атмосфера.

Если вы располагаете хотя бы небольшим насосом для выкачивания воздуха, то он даст вам возможность сделать много интересных опытов.

На тарелку воздушного насоса поставьте цилиндр без дна и затяните верхнее его отверстие резиной или пузырем. Как только вы немного выкачаете из цилиндра воздух, атмосферное давление заставит прорваться резину или пузырь (рис. 128).



Рис. 128.

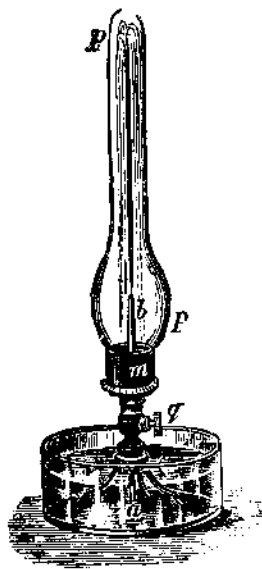


Рис. 129.

Из сосуда *P* (рис. 129) выкачайте через отверстие *a* в трубке *ab* воздух и закройте его краном *q*. Опустите затем конец этой трубки в сосуд с водою и повернув кран, откройте отверстие. Под давлением атмосферы вода с силой устремится по трубке и начнет бить фонтаном.

Два медных полых полушария плотно прижимаются друг к другу и из пространства между ними выкачивается воздух (рис. 130). Попробуйте теперь их оторвать один от другого и объясните, почему это вам не удастся.

В XVII столетии в г. Магдебурге (Германия) был проделан подоб-

ный опыт. Несколько лошадей не могли оторвать полушария. Но достаточно было впустить в пространство между ними воздух и любой ребенок без труда мог их разъединить.

Каково же давление атмосферы? Чтобы дать ответ на этот вопрос, сделаем опыт, впервые произведенный в 1640 году итальянцем Торичелли.

§ 118. Опыт Торичелли. Возьмите стеклянную трубку длиной около 1 м, запаянную с одного конца и открытую с другого, наполните ее ртутью и, заткнув открытый конец пальцем, погрузите ее в сосуд с этой же жидкостью (рис. 131). Отняв палец, вы заметите, что уровень ртути в трубке понизится и установится на некоторой определенной высоте A .

На поверхность ртути в открытой части сосуда давит атмосферный воздух, внутри же

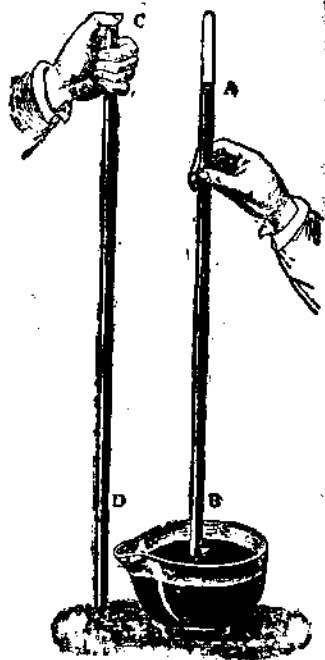


Рис. 131.



Рис. 130.



трубки воздуха нет, и давление производит только столб ртути. Конечно, вес столба этой жидкости уравнивает давление столба атмосферы такого же, как и трубка, по площади сечения.

Измерим высоту столба ртути в трубке; она окажется равной приблизительно 76 см. Не трудно подсчитать давление этого столба на поверхность ртути в сосуде, оно равно

$$P = shd \text{ г,}$$

где s — площадь сечения трубки, h — высота столба ртути (она равна 76 см), d — удельный вес ртути = 13,6 г/см³.

Если трубка имеет площадь сечения в 1 см², то

$$P = 1 \times 76 \times 13,6 \approx 1033 \text{ г.}$$

Итак, столб ртути на 1 см^2 поверхности этой жидкости в сосуде давит с силой в 1033 г. Давление атмосферы на каждый квадратный сантиметр поверхности ртути в открытой части сосуда также должно равняться 1033 г. Если бы давление воздуха было больше, чем давление столба ртути, то этот последний должен был бы подняться, в противном случае он вынужден был бы опуститься.

119. Барометры. Только-что описанная нами вертикальная трубка, наполненная ртутью и опрокинутая над сосудом с этой же жидкостью, представляет собой простейший *барометр*¹ — прибор для измерения атмосферного давления. Для удобства пользования необходимо только снабдить его шкалой с делениями (рис. 132). Такой барометр носит название *чашечного*.

Давление атмосферы, уравновешиваемое столбом ртути высотой в 76 см (или 760 мм), считается *нормальным*. Оно не всегда остается таким — иногда давление увеличивается, иногда уменьшается. Точно знать, чему равно атмосферное давление в данный момент, часто бывает чрезвычайно важно, вот почему барометры представляют собой нужные и весьма распространенные приборы.

Рис. 133 изображает другой ртутный барометр, получивший название *сифонного*. Он состоит из стеклянной трубки с двумя неравными коленами. Бóльшее из них запаяно и заполнено ртутью, меньшее открыто.

Давление атмосферы на поверхность ртути в открытом колене уравновешивается весом столба ртути в закрытом колене, высота которого равна разности высот ртути в обоих коленях.

Шкала с делениями делается у барометра подвижной, нулевое деление этой шкалы ставится на уровне ртути в открытом колене, деление же, стоящее на уровне ртути в верхнем колене, покажет высоту столба, уравновешивающего атмосферное давление.

Можно также сделать шкалу неподвижной, расположив нуль ее посередине и нанеся деления вверх и книзу от нуля. Давление атмосферы будет измеряться суммой отсчетов ($410 + 350 \text{ мм}$ для случая, изображенного на рис. 133).

Ртутные барометры отличаются точностью и простотой. Если воз-



Рис. 132.

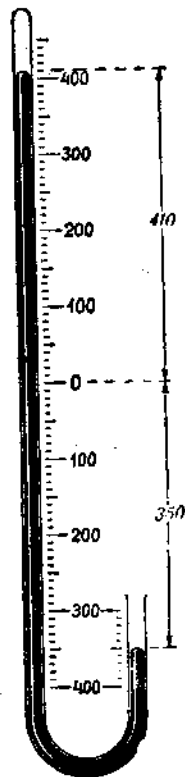


Рис. 133.

¹ Слово «барометр» произошло от двух греческих слов: «*báros*» — «вес» и «*metron*» — «мера».

дух попадает в пространство над поверхностью ртути в трубке чашечного или в закрытое колено сифонного барометра,¹ то без особых затруднений можно заново наполнить трубку ртутью. Однако ртутные барометры неудобны при путешествиях.

В подобных случаях всегда пользуются металлическими барометрами, получившими название *анероидов*.²

Из анероидов наибольшее распространение получил анероид *Види*, он изображен на рис. 134. Из короткой цилиндрической металлической коробки *A* выкачивается воздух; атмосферное давление, не встречая противодействия воздуха изнутри коробки, стремится сплющить ее. Чтобы воспрепятствовать, однако, атмосферному давлению совершенно продавить коробку, ее верхнее основание соединяется с упругой пружиной *C*. При изменении атмосферного давления верхнее основание

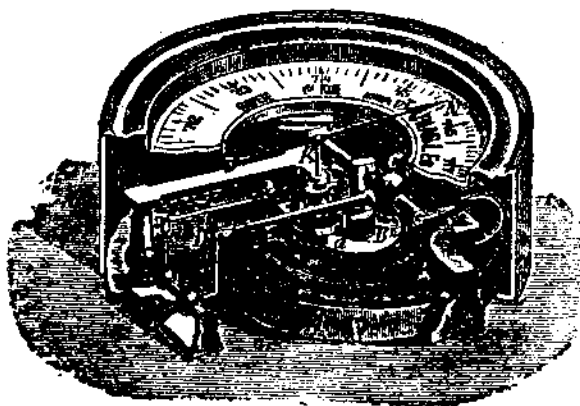


Рис. 134.

коробки *A*, сжимая или растягивая пружину *C*, прогибается внутрь или несколько выпрямляется (оно сделано волнообразным для увеличения прогиба). К центру верхнего основания коробки прикреплен стержень *B*, который через посредство системы рычагов и пружин передает свое перемещение горизонтальной стрелке *N*.

При увеличении прогиба (при возрастании атмосферного давления) стрелка передвигается вправо, при уменьшении давления — влево. Деления на циферблате, по которому перемещается конец стрелки, наносятся при помощи ртутных барометров.

Анероиды отличаются чувствительностью и очень удобны для переноски. Их недостаток — неточность. Упругость верхнего основания металлической коробки, а также пружин, служащих для передвижения стрелки, с течением времени изменяется, вследствие чего анероид дает неверные показания. Для избежания ошибок, могущих произойти при пользовании анероидами, их нужно не менее двух раз в год испытывать, сравнивая при разных давлениях с ртутным барометром, записывать ошибки и вводить соответствующие поправки при дальнейшем пользовании.

§ 120. Барометрическое нивелирование. При съемке планов местности очень часто приходится также производить и измерение высот.

¹ Пустое пространство над поверхностью ртути в трубках чашечного и сифонного барометров часто называется «торическая пустота».

² Слово «анероид» в переводе с греческого языка буквально значит «без жидкости».

Работы этого рода носят название *нивелирования*.

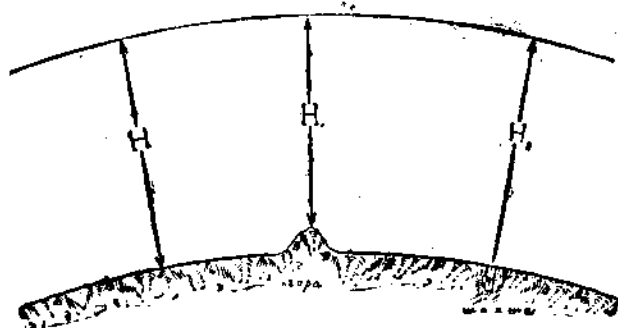
В тех случаях, когда достаточно бывает ограничиться приближенными результатами, почти всегда пользуются барометрами.

Еще Паскаль показал, что по мере поднятия вверх давление атмосферы уменьшается, так как столб воздуха, производящий давление, становится короче, причем отсутствуют нижние, наиболее плотные его слои.

На рис. 135 изображена часть поверхности Земли. На вершине горы давление H_1 меньше, чем у ее подножия H , на дне же глубокой шахты давление H_2 , наоборот, больше, чем на поверхности Земли.

Вот данные о давлении атмосферы на различных высотах:

	Высота	Показания барометра
На уровне моря	0 м	760 мм
Вершина Везувия	1200 »	600 »
» Этны	3320 »	510 »
» Мон-Блана	1800 »	424 »
» Ток-Джалунг (Тибет), высшее поселен. место	4979 »	413 »
Вершина Ибн-Гамина (Гималаи), одна из наиболее высоких гор	6760 »	340 »



Невозможно возникает вопрос, нельзя ли, измеряя давление атмосферы в двух разных точках (например, у вершины горы и у ее подножия), определить разность высот между ними.

Удельный вес воздуха у поверхности Земли при нормальных условиях 0,0013 г/см³. Столб воздуха, высота которого уравновешивает давление столба ртути в 1 см, может быть легко определен из следующих соображений.

На площадь 1 см² столб ртути высотой в 1 см давит с силой

$$P = 1 \times 1 \times 13,6 \text{ г.}$$

Высоту столба воздуха, уравновешивающего это давление, обозначим через x см, тогда его давление на площадь 1 см² будет равно:

$$P = 1 \times x \times 0,0013,$$

откуда

$$1 \times x \times 0,0013 = 13,6 \times 1,$$

или

$$0,0013 x = 13,6$$

$$x = \frac{13,6}{0,0013} = 10466 \text{ см} \approx 105 \text{ м.}$$

Если бы удельный вес воздуха не уменьшался по мере поднятия вверх, то давление атмосферы убывало бы на 1 см ртутного столба при поднятии на 105 м (или на 1 мм при поднятии приблизительно на 10,5 м).

Однако это вычисление применимо только для незначительных высот, ибо удельный вес воздуха быстро уменьшается по мере поднятия вверх. В тех же случаях, когда разность высот более

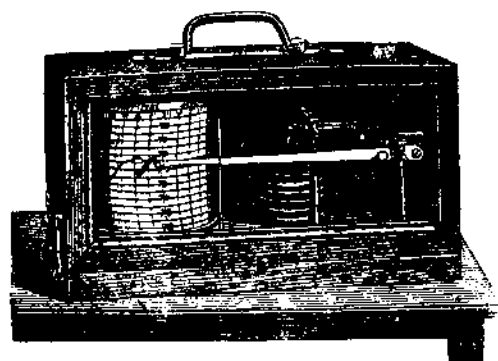


Рис. 136.

100 м, следует пользоваться формулой, данной математиком Лапласом или таблицами, в которых вычислена разность высот, соответствующая определенной разности показаний барометров в двух различных пунктах.

Кроме того, приходится принимать во внимание и температуру воздуха, так как удельный вес его при изменении температуры меняется.

Барометрическое нивелирование на практике производится обычно следующим образом. Один наблюдатель остается с барометром на станции (в пункте, высота которого

над уровнем моря известна) и систематически через равные промежутки времени записывает показания барометра.

Положим в 9	час.	атмосф.	давление было равно	754,2 мм
»	» 9.30	»	»	» 755,0 »
»	» 10	»	»	» 755,3 »
»	» 10.30	»	»	» 755,6 »

и т. д.

Второй наблюдатель отправляется в путешествие, также взяв с собой aneroid. В пунктах, представляющих собою характерные точки рельефа местности (например, вершины гор), он записывает показания anerоида и время производства наблюдения.

Пусть в пункте А в 9	час.	показание anerоида было	730,0 мм
»	» B » 9.15	»	» 726,4 »
»	» B » 9.40	»	» 720,1 »

и т. д.

Итак, на станции в 9 час. было давление 754,2 мм, тогда как в пункте А в то же время было давление 730,0 мм. Разность давлений в 754,2 — 730,0 = 24,2 мм дает возможность определить по таблицам разность высот станции и пункта А.

Чтобы определить давление на станции в 9 час. 15 мин., выясним, на сколько изменилось оно за промежуток времени между двумя последовательными записями. За 30 минут давление увеличилось на 0,8 мм.

На сколько оно увеличилось за 15 минут?

30 мин. — 0,8 мм, откуда: $x : 0,8 = 15 : 30$;
 15 » — x » ;

$$x = \frac{0,8 \times 15}{30} = 0,4 \text{ мм.}$$

Следовательно, в 9 час. 15 мин. на станции было давление 754,2 + 0,4 = 754,6 мм.

Разность давлений на станции и в пункте В:

$$754,6 - 726,4 = 28,2 \text{ мм и т. д.}$$

При записи времени наблюдения и соответствующего давления необходимо вводить поправки также отмечать и температуру воздуха.

Вместо того чтобы оставлять на станции наблюдателя, можно поставить *барограф* — самозаписывающий aneroid.

На рис. 136 изображен барограф обычного типа. Вместо одной коробки, как у барометра Вьди, в барографе установлено несколько таких коробок, причем середина верхней из них посредством системы рычажков соединяется со стрелкой, движимой пором. С помощью часового механизма приводится в движение барабан, обтянутый разноцветной бумагой, к которой прижимается перо и чертит плавную линию, отмечающую изменение атмосферного давления за известный промежуток времени. На рис. 137 представлен образец записи барографа.

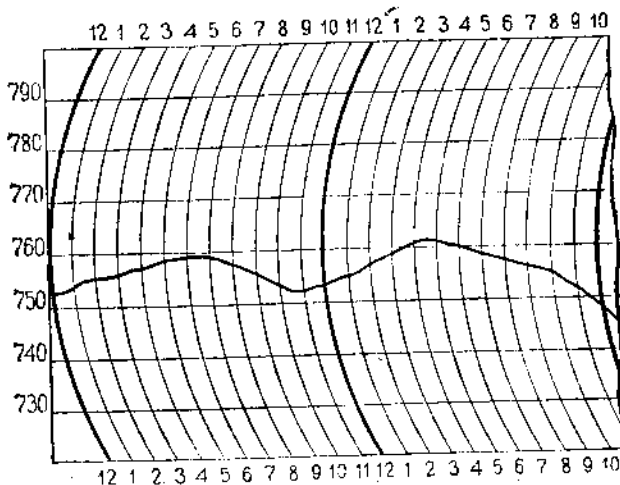


Рис. 137.

Барометры и барографы получали широкое применение при совершении полетов по воздуху. Высота поднятия воздушных судов определяется намерением соответствующего атмосферного давления.

§ 121. Применение барометра для предсказания погоды. Одно-временные определения атмосферного давления на многих метеорологических станциях дают возможность наносить на географические карты *изобары*, т. е. линии, соединяющие места с одинаковым атмосферным давлением. Зная распределение изобар над какой-либо местностью, можно знать направление ветра в любом пункте этой местности, так как воздух на поверхности Земли должен двигаться всегда к центру низкого давления (несколько отклоняясь вправо в северном полушарии вследствие вращения Земли). Направление же ветра влияет на состояние погоды (так, например, ветер, дующий в Западной Европе в юго-западном направлении, обычно несет много водяных паров, северо-восточный ветер, наоборот, несет мало водяных паров и вызывает сухую погоду).

Если бы можно было точно предсказать, в каком направлении станет перемещаться центр низкого давления, какой он выберет путь над поверхностью Земли, ибо он с течением времени должен перемещать свое место, — можно было бы знать, как в данном месте будет

постепенно меняться направление ветра, а значит и знать направление изменения погоды.

Однако до сих пор еще наука о процессах в атмосфере — *метеорология* — не располагает надежными данными для предугадывания путей перемещения системы изобар, а потому вопрос о предсказании погоды не решен окончательно. Во всяком случае, как видно из сказанного, знание барометрического давления не только в данном месте, но и в соседних пунктах для этого совершенно необходимо.

Можно еще добавить, что обычно в нашем климате уменьшение барометрического давления предвещает ненастье, наоборот, его повышение в большинстве случаев влечет прояснение неба, а значит жаркую погоду летом, зимой же мороз. Поэтому на анероидах часто встречаются надписи: около делений, показывающих низкое давление, — «дождь», «буря» и т. д., а по другую сторону — «ясно», «сушь» и т. д. Не следует только особенно доверяться этим надписям.

§ 122. Закон Бойля-Мариотта. Что произойдет, если мы будем сжимать газ? Объем его станет уменьшаться, давление же при этом будет воз-

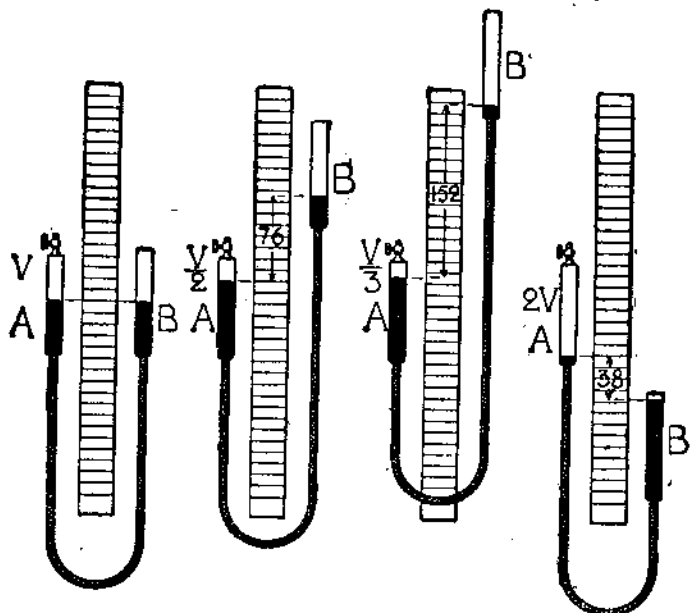


Рис. 138.

Рис. 139.

Рис. 140.

Рис. 141.

растать. На рис. 138 изображен прибор, с помощью которого легко будет установить связь между объемом и давлением одной и той же массы газа.

Он состоит из двух стеклянных трубок, соединенных между собою длинной резиновой трубкой. Одна из трубок (A) снабжена в верхней своей части краном, вторая (B) открыта. Оставив кран в трубке A открытым, напомним ртутью резиновую и стеклянную трубки до определенной черты; ртуть при этом будет стоять в обеих трубках на одинаковой высоте.

Закроем теперь край в трубке A , изолировав таким образом некоторую массу воздуха, например 40 см^3 , и начнем поднимать правое колено B ; ртуть в левом колене начнет подниматься, сжимая заключенный там воздух; как только объем его уменьшится вдвое и делается равным 20 см^3 , измерим разность высот ртути в обоих коленях. Окажется, что в правом колене ртуть выше, чем в левом, на 76 см (рис. 139). Итак, давление справа на поверхность ртути на уровне, соответствующем горизонту ее в левом колене, 2 атмосферы (наружный воздух плюс столб ртути в 76 см). Оно уравнивается упругостью сжатого в колене A воздуха. Отсюда мы можем сделать вывод, что при уменьшении объема воздуха вдвое упругость его увеличивается тоже в два раза.

Если мы еще поднимаем правое колено так, чтобы объем воздуха уменьшился втрое (рис. 140), давление возрастает в три раза (наружный воздух + столб ртути в $2 \times 76 = 152 \text{ см}$) и т. д.

Наоборот, понижая правое колено, мы заставим опускаться ртуть и в левом колене, объем замкнутой там массы воздуха будет увеличиваться, давление же уменьшаться. На рис. 141 изображен случай, когда объем воздуха в колене A увеличится вдвое, разность высот уровней ртути в этом случае равна 38 см . Справа на поверхность ртути давит атмосфера, слева же на поверхность ртути на том же уровне давит разреженный воздух в колене A плюс столб ртути высотой в 38 см . При равновесии давление атмосферы справа уравнивается давлением слева; разреженный воздух имеет, следовательно, при этом упругость в $1/2$ атмосферы.

Таким образом, мы приходим к выводу, что *при неизменной температуре* (во время опыта температура была постоянной) *объем некоторой массы воздуха (или иного какого-либо газа) обратно пропорционален производимому на него давлению*. Это положение известно под названием *закона Бойля-Мариотта*.

Обозначим первоначальный объем некоторой массы газа через v , новый объем через v_1 , а соответствующие давления через p и p_1 .

Тогда

$$\frac{v}{v_1} = \frac{p_1}{p}.$$

Изобразим теперь графически результаты наших опытов (рис. 142). На оси X будем откладывать объем газа, а на оси Y соответствующее давление. Отмеченные таким образом точки соединим линией. Полученная кривая наглядно изображает связь между объемом газа и давлением и носит в математике название *гиперболы*. Точки ее

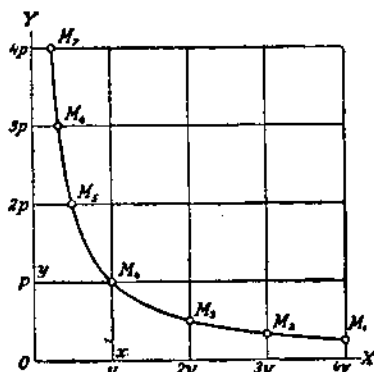


Рис. 142.

обладают тем свойством, что произведение расстояний любой точки этой кривой до оси X и оси Y есть величина постоянная.

Таким образом, *произведение объема газа на соответствующее давление представляет собою величину постоянную (при неизменной температуре)*:

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

Тот же вывод мы получим, приравняв в пропорции

$$\frac{v}{v_1} = \frac{p_1}{p}.$$

Произведение крайних членов равно произведению средних:

$$vp = v_1 p_1.$$

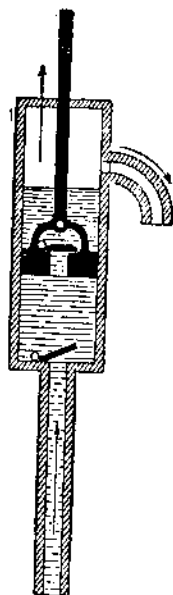


Рис. 143.

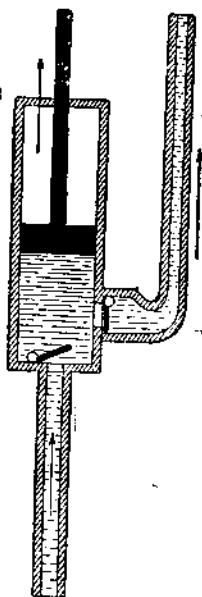


Рис. 144.

§ 123. Водяные насосы. На рис. 143 представлен *всасывающий насос*. Насос имеет два клапана: один при входе трубы в цилиндр, другой в поршне, оба клапана открываются только вверх.

Предположим, что поршень вниз. При поднятии его вверх под поршнем образуется пустота, вода, испытывая снаружи трубы атмосферное давление, будет подниматься за поршнем, откроет нижний клапан и войдет за поршнем, наружное атмосферное давление плотно прижмет верхний клапан в поршне и не позволит входить воздуху сверху.

При обратном ходе поршня только-что вошедшая в цилиндр вода под давлением поршня сжимается, открывает верхний клапан и входит в пространство над поршнем, прижимая при этом нижний клапан.

Отверстие в поршне, закрываемое клапаном, должно при самом высоком его поднятии стоять не выше 10,3 м над уровнем воды в бассейне, откуда накачивается вода, в противном случае вода не пойдет за поршнем (так как столб воды высотой 10,3 м своим весом уравнивает давление атмосферы). Вследствие несовершенства устройств насосов они изготовляются таким образом, чтобы указанная высота не превосходила 7—8 м.

Рис. 144 изображает *всасывающе-нагнетательный насос*. Устройство его понятно из рисунка. Насос имеет два клапана: один у входа трубы цилиндра, другой в боковой трубке. При поднятии поршня вверх второй клапан закрывается, первый — открывается, и вода входит под поршень; при опускании же поршня первый клапан закрывается, вода поступает в боковую трубку, поднимая второй клапан.

Высота поднятия воды в боковой трубке может быть теоретически безгранично велика, практически же она не превосходит обычно не-

скольких десятков метров, так как давление уже поднявшегося в боковой трубе столба воды столь сильно прижимает клапан в ней, что для его поднятия и выпуска еще некоторого количества воды потребуются громадные давления; кроме того стенки и дно трубы не смогут выдержать очень высокого давления.

Всасывающий и всасывающе-нагнетательный насосы имеют один существенный недостаток. Они дают прерывистую струю, которая бьет лишь при одном ходе поршня (например, в всасывающе-нагнетательном насосе струя бьет лишь при опускании поршня). В тех случаях, когда нужно получить непрерывную струю,

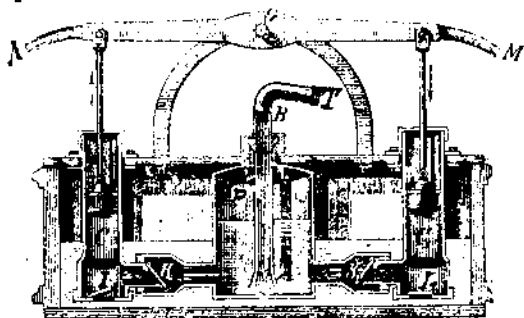


Рис. 145.

пользуются двумя соединенными вместе всасывающе-нагнетательными насосами. Таков, например, *пожарный насос* (рис. 145).

При поднятии поршня в правом цилиндре всасывается новая порция воды, при этом поршень в левом цилиндре опускается и выталкивает уже ранее вошедшую туда воду в колокол *P*; при обратном ходе поршня в этот колокол будет поступать вода из правого цилиндра. По мере поступления воды под колокол воздух, находящийся в нем, сжимается и выталкивается по трубке *T* в виде сильной струи. Струя продолжает бить некоторое время даже в случае небольшой остановки действия насоса под давлением сжатого в колоколе *P* воздуха.

§ 124. Гидравлический пресс. Идея устройства гидравлического пресса дала в гл. XI. На рис. 146 изображено ее практическое осуществление.

Цилиндры *D* и *C* соединены между собой трубкой и наполнены маслом. Действуя ручкой *P*, заставляют поршень *A* ходить вверх и вниз в цилиндре *C*. При подъеме поршня открывается клапан *d*, и вслед за

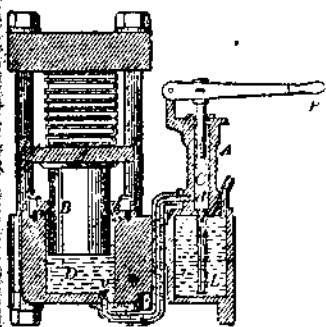


Рис. 146

поршнем в цилиндр входит масло из резервуара *L*. Клапан *e* при этом закрыт.

При опускании поршня *A* вошедшее в цилиндр *C* масло испытывает давление, клапан *d* закрывается, клапан *e* открывается, и масло переходит в цилиндр *D*, поднимая при этом поршень *B*.

§ 125. Сифон. Чтобы перелить жидкость не наклоняя сосуда, часто пользуются *сифоном*, представляющим собой изогнутую трубку (рис. 147), один конец которой опускается в опоражниваемый сосуд, другой в резервуар, куда вытекает жидкость.

Чтобы сифон привести в действие, необходимо предварительно наполнить жидкостью оба колена его трубки; это проще всего сделать, втягивая в себя воздух через отверстие на длинном конце; образующая при этом пустоту заполняется жидкостью, входящая под влиянием атмосферного давления через короткое колено, опущенное в опорожняемый сосуд. Как только трубка наполнится жидкостью, эта последняя начнет переливаться непрерывной струей до тех пор, пока уровень ее в обоих сосудах не сравняется.

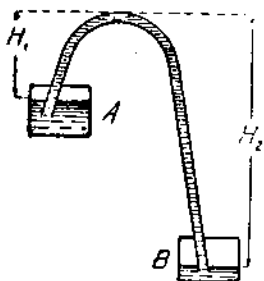


Рис. 147.

Рис. 148 изображает сифон, которым следует воспользоваться в том случае, когда желают, чтобы переливаемая жидкость не попала в рот при втягивании воздуха. Воздух удаляется через отверстие *b* в боковой трубке, причем предварительно закрывается конец *a*.

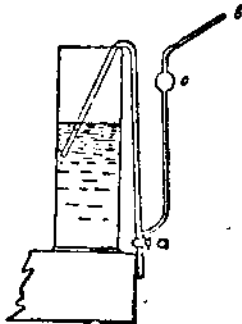


Рис. 148.

Что является причиной переливания жидкости? Атмосферное давление. Конечно, воздух давит как на поверхность жидкости в сосуде *A* (рис. 147), так и в сосуде *B*, но первому давлению противодействует вес столба жидкости высотой H_1 см, второму же давлению противодействует более тяжелый столб высотой H_2 см.

Таким образом, сила, которая гонит жидкость из сосуда *A* в *B*, — это давление атмосферы, уменьшенное на вес столба жидкости высотой H_1 см. Сила, которая стремится создать движение жидкости в противоположном направлении, — это давление атмосферы, уменьшенное на вес столба жидкости высотой H_2 см. Первая разность больше, так как при равных уменьшаемых у нее меньше вычитаемое (столб H_1 короче столба H_2), и жидкость перетекает в направлении от *A* к *B*.



Рис. 149.

§ 126. Пипетка. Обращали ли вы внимание на то, каким прибором пользуется врач, когда ему нужно пустить в глаз несколько капель лекарства? Он берет пипетку — тонкую стеклянную трубку с узким отверстием на одном конце и маленьким резиновым шариком на другом. Сжимая шарик (рис. 149), он выдвигает из него воздух, затем, опустив конец трубки в жидкость, разжимает пальцы; шарик выпрямляется, объем воздуха, находящегося в трубке, увеличивается, давление его при этом уменьшается. Наружное атмосферное давление заставляет войти в трубку несколько капель жидкости. Достаточно теперь снова сжать резиновый шарик, и из трубки будут выдавливаться капли жидкости.

§ 127. Воздушные разрежающие насосы. На рис. 150 изображен простейший воздушный насос, служащий для разрежения воздуха в пространстве под колоколом.

Насос имеет два клапана, оба открывающиеся вверх. При поднятии поршня давление наружного воздуха закроет клапан 1 в поршне; под поршнем образуется пустота; стремясь ее заполнить, устремляется в цилиндр, поднимая клапан 2, воздух из-под колокола. При

опускании поршня только-что поступивший в цилиндр воздух сжимается и закрывает нижний клапан; как только давление его делается больше наружного атмосферного давления, клапан 1 открывается, и воздух начнет выходить наружу.

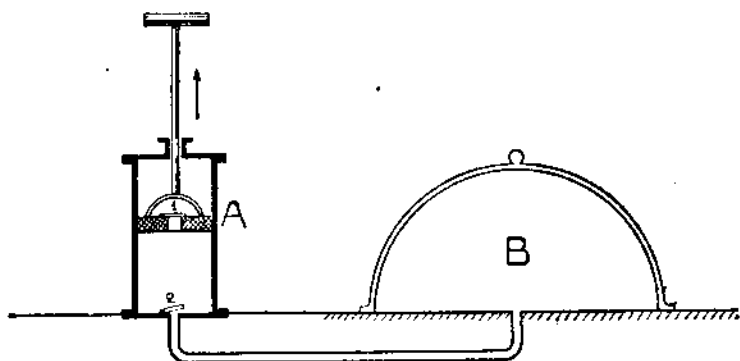


Рис. 150.

Таким образом, при каждом поднятии поршня часть воздуха из-под колокола переходит в цилиндр, при опускании же поршня этот воздух выталкивается наружу. При каждом качании поршня давление воздуха, находящегося под колоколом, будет уменьшаться; однако полной пустоты достичь конечно невозможно.

Насос описанного устройства имеет ряд недостатков. По мере разрежения воздуха под колоколом давление его, как мы отметили выше, убывает и, наконец, делается столь малым, что будет не в состоянии поднять клапан 2. Кроме того, все поршневые насосы имеют второй существенный недочет: нижняя поверхность поршня никогда не прилегает вплотную ко дну цилиндра, в пространстве между ними (оно носит название *вредного пространства*) всегда остается воздух, который также препятствует успешной работе насоса.

Первый недостаток устраняется устройством клапанов, открывающихся не вследствие давления воздуха, а автоматически при движении поршня. Насос такого типа с двумя цилиндрами (когда в одном цилиндре поршень опускается, в другом поднимается) изображен на рис. 151.

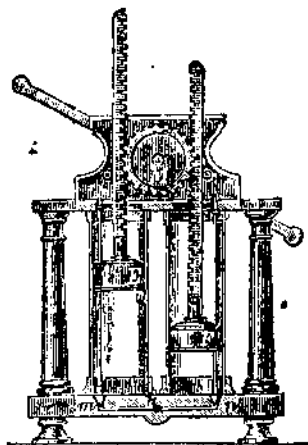


Рис. 151.

Второй недостаток устраняется тем, что вредное пространство заполняется маслом. Такие насосы называются *масляными*.

Лучшие поршневые насосы дают возможность довести степень разрежения воздуха до 0,1 мм ртутного столба. В тех же случаях, когда

нужно достичь большего разрежения. рекомендуется воспользоваться насосом, в котором прямолинейное движение поршня заменено вращательным движением.

Цилиндр *D* (рис. 152) вращается вокруг оси, не совпадающей с осью коробки *C*. В стенке цилиндра сделаны два прореза, в которые вставлены пластинки *a* и *b*, прижимающиеся пружинами к стенкам коробки. Трубка *A* ведет к пространству, откуда выкачивается воздух; через отверстие *B* воздух выталкивается наружу.

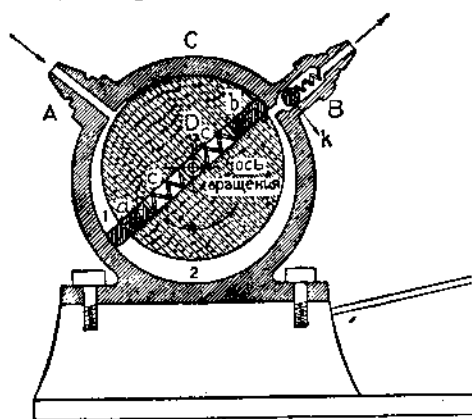


Рис. 152.

При вращении цилиндра в пространство между пластинками *a* и *b* захватывается из трубки *A* некоторое количество воздуха (первый полуоборот цилиндра), при втором полуобороте этот воздух выталкивается через отверстие *B*.

Насосы подобного типа дают возможность довести степень разрежения до 0,01 мм ртутного столба.

§ 128. Пылесосы. Пылесосы служат для очистки помещений от пыли. Рисунок 153 изображает небольшой ручной пылесос. При движении рукоятки вправо и влево через наконечник всасывается воздух, а вместе с ним и пыль.

Пусть рукоятка *D* движется вправо, при этом резиновая перегородка между камерами *B* и *C* также выгибается вправо, в камере *B* воздух разрежается, в камере *C* — сжимается. В камере *B* клапан 3 открывается и в нее всасывается воздух, который входит через наконечник *E* и проходит через сосуд *G*. Клапан 1 при этом закрыт. В камере *C* воздух сжимается, закрывает клапан 4, открывает клапан 2 и выходит из пылесоса.

При перемещении рукоятки *D* влево резиновая перегородка сжимает воздух в камере *B* (клапан 3 закрывается, а через открытый клапан 1 воздух выходит из пылесоса), в камере *C*, наоборот, происходит разрежение, через клапан 4 засасывается воздух, клапан же 2 закрыт. Итак, воздух засасывается беспрерывно то в камеру *B*, то в камеру *C*. Поступающая в резервуар *G* вместе с воздухом пыль задерживается матерчатым мешком *F*. Крышка *K* служит для удаления пыли из резервуара *G*.

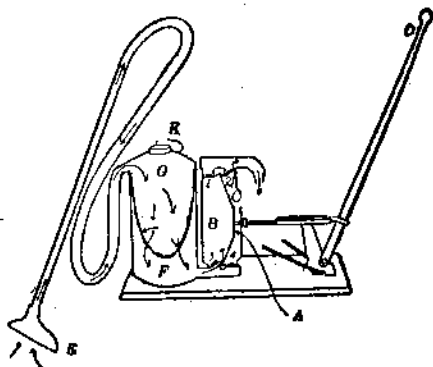


Рис. 153.

§ 129. Воздушные нагнетательные насосы (компрессоры). Простейший нагнетательный насос отличается от разрежающего насоса только тем, что оба его клапана открываются не кверху, а книзу (см. рис 150). При поднятии поршня вверх давление сжатого воздуха

из пространства *B* закроет нижний клапан 2, наружный воздух при этом открывает верхний клапан 1 и войдет в цилиндр. При обратном ходе поршня поступивший в цилиндр воздух будет сжиматься, закроет верхний клапан 1, откроет нижний 2 и станет выталкиваться в пространство *B*.

На рис. 154 изображена схема устройства насоса для примуса.

При движении стержня *m* слева направо давление воздуха внутри примуса закрывает клапан 1, и в цилиндре под поршнем образуется разреженное пространство. Кожаный колпачек *K*, играющий роль поршня при этом сжимается, отлекая от стенок цилиндра, и воздух снаружи входит в цилиндр. При обратном движении стержня вошедший в цилиндр воздух расправляет колпачек *K*, он плотно прижимается к стенке цилиндра и препятствует выходу воздуха. Клапан 1 открывается, и воздух входит внутрь резервуара примуса.

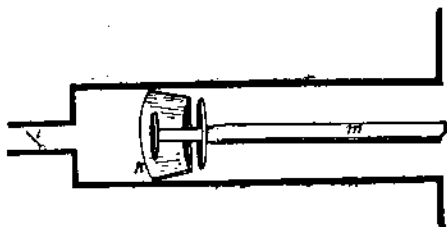


Рис. 154.

Разрезающий насос, изображенный на рис. 152, может также служить и компрессором. Нужно только через трубку *A* засасывать воздух, а отверстие *B* соединить с пространством, куда он нагнетается.

Сжатый воздух и другие газы обычно сжимаются до давления 200 атмосфер и вводятся в особые стальные бомбы, в которых их очень удобно перевозить. В виду разнообразия и важности применения сжатых газов, вопрос об этом выделяется в особую главу.

§ 130. Манометры. Для измерения того давления, под которым находится сжатый газ или пар, пользуются приборами, называемыми *манометрами*.

Рис. 155 изображает *открытый ртутный манометр*. Он представляет собою длинную стеклянную трубку, нижний конец которой плотно вставлен в замкнутый сосуд с ртутью, а верхний открыт. Трубка соединяется с сосудом, где находится сжатый газ; вследствие его давления на поверхность ртути в сосуде ртуть поднимается по трубке вверх до тех пор, пока давление столба ртути плюс атмосферное давление не уравновесит давления сжатого газа. Если ртуть поднимается до высоты 76 см, то сжатый газ имеет упругость 2 атмосферы, если до 152 см — 3 атмосферы и т. д.

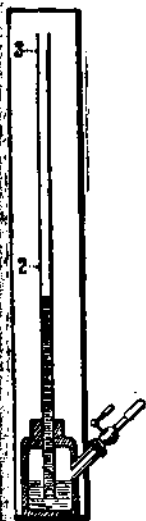


Рис. 155.

Ртутные манометры, хотя и дают верные показания, но не отличаются прочностью и неудобны для измерения высоких давлений, вот почему наибольшее распространение получили *металлические манометры* (рис. 156), действие которых основано на стремлении изогнутой спирально трубки со сплюснутыми стенками разворачиваться в том случае, если давление изнутри превосходит давление извне, и свертываться при преобладании давления снаружи. Латун-

ная трубка, изогнутая спирально, с помощью крана сообщается с пространством, где находится сжатый газ или пар. Другой конец ее при помощи стержней и зубчатой передачи соединяется со стрелкой, перемещающейся по циферблату.

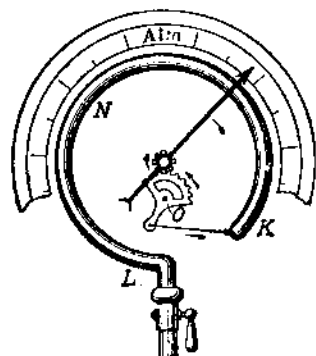


Рис. 156.

§ 131. Вопросы и задачи. 194. На какой высоте будет стоять столб ртути в чашечном барометре, если давление воздуха составляет $\frac{3}{4}$ атмосферы?

195. Выразите в атмосферах давление столба ртути высотой в 96,52 см.

196. Выразите атмосферное давление в кг/см^2 , если столб ртути, его уравновешивающий, имеет высоту в 77,5 см.

197. На какую высоту (теоретически) может поднять всасывающий насос масло (уд. вес $= 0,9 \text{ г/см}^3$) и керосин (уд. вес $= 0,83 \text{ г/см}^3$)?

198. Под каким давлением работают люди в кессоне, если глубина погружения кессона 25 м? Давление снаружи 780 мм ртутного столба.

199. В трубке, открытым концом погруженной в резервуар со ртутью, уровень ртути в трубке на 36 см выше, чем в сосуде. Под каким давлением находится воздух в трубке, если наружное атмосферное давление равно 765 мм?

200. Площадь поршня всасывающе-нагнетательного насоса 120 см^2 . С какой силой нужно давить на поршень при подъеме воды на высоту 20 м?

201. Какое давление нужно было произвести, если бы вместо воды в предыдущей задаче поднимался керосин (уд. вес $0,83 \text{ г/см}^3$)?

202. В цилиндре находится газ под давлением 2 атмосфер. Каково будет давление газа, если поршень, сжимающий газ и находящийся наверху цилиндра, опустится на $\frac{1}{3}$ его высоты?

203. В стальной бомбе находится 1 м^3 сжатого воздуха при 0° и под давлением 200 атмосфер. Какой вес имеет этот воздух?

204. Какой вес имеет оставшийся в бомбе предыдущей задачи воздух, если часть его взята и оставшееся давление сделалось равным 10 атмосферам?

205. Объем сосуда, откуда выкачивается воздух, V , объем цилиндра разрежающего насоса W . Какое давление будет иметь воздух в сосуде после n качаний поршня? Первоначальное давление воздуха в сосуде равнялось атмосферному давлению и было равно H .

206. Какое давление будет иметь воздух в сосуде объемом V после n качаний нагнетательного насоса, из цилиндра которого (объемом W) воздух поступает в сосуд? Атмосферное давление равно H .

207. На какую высоту может поднять воду всасывающе-нагнетательный насос, если диаметр его поршня равен 10 см, давление же, производимое на поршень, составляет 500 кг ?

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

ПРИМЕНЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА.

§ 132. Применение сжатого воздуха для работ под водою. Человек не может пробыть долгое время под водою, а между тем для производства некоторых работ людям приходится опускаться глубоко под поверхность воды. Применение сжатого воздуха дает возможность в настоящее время производить весьма сложные подводные работы.

Простейший прибор для подобных работ — *водолазный колокол*, представляющий собой большой ящик, открытый снизу. По мере его опускания вода входит

колокол, сжимая заключенный в нем воздух. Если в колокол непрерывно накачивать сжатый воздух, то он, во-первых, будет хотя бы отчасти вытеснять вредную воду, а во-вторых, даст возможность людям, находясь внутри колокола, дышать свежим воздухом (в противном случае кислород воздуха будет быстро израсходован, и дальнейшее дыхание и горение будут невозможны).

Водолазный колокол в настоящее время почти не применяется. Для мелких подводных работ, например, собирания губок, кораллов, исправлений в подводной части судов, исследований потонувших пароходов, пользуются водолазным аппаратом — скафандром; для больших же работ (по устройству устоев мостов, маяков, шлюзов и т. д.) применяют исключительно кессоны.

Для производства водолазных работ человек надевает непромокаемую резиновую одежду (скафандр), верхняя часть которой оканчивается медным шлемом (рис. 157), снабженным отверстиями со стеклами.

От шлема идет резиновая трубка к непрерывно работающей воздуходувной машине, расположенной на судне или на берегу; поступающий в шлем воздух дает возможность водолазу дышать, а также препятствует воде проникать внутрь одежды. В задней части шлема имеется клапан, открывающийся наружу, через который выходят пузырьками испорченный воздух. Для погружения в воду водолаз надевает на ноги особые галоши с подошвами, сделанными из свинца, весом до 10 кг каждая. Кроме того, на него надевают два груза: один — на спину, а другой — на грудь, с общим весом до 30 кг.

К одежде водолаза привязывается сигнальная веревка; держа за нее, водолаз подает сигналы. Наибольшая глубина, на которую опускались водолазы, — 60 м, давление воды на этой глубине около 6 атмосфер.

Кессон представляет собой закрытый сверху железный ящик (рабочую камеру), опускаемый на дно реки или моря для производства работ по сооружению основания для быков моста, мостов, шлюзов и проч.

Нижний край рабочей камеры кессона (рис 158) носит название *нажда*; он постепенно врезается в грунт, который вырывается находящимися внутри рабочей камеры кессона рабочими и с помощью шахтных труб удаляется наружу; на потолке же камеры вокруг шахтных труб постепенно возводится каменная кладка. По мере опускания кессона шахтные трубы парализуются.

Как только нижний край камеры кессона достигнет прочного грунта, рабочие начинают заполнять кладкой внутренность камеры. Когда они близко подойдут к толку то оставшееся пространство в камере и внутренность труб заливают бетоном, и основание готово.

Из установленных на берегу или на судах компрессоров по шахтной трубе

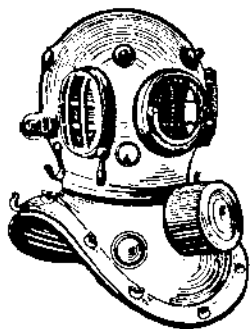


Рис. 157.

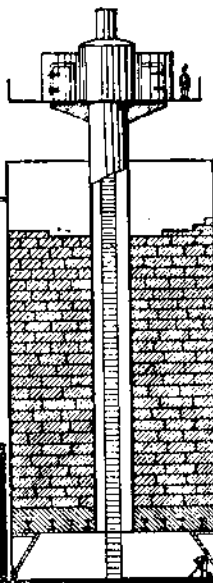


Рис. 158.

в рабочую камеру непрерывно нагнетают сжатый воздух, который не дает воде проникнуть в рабочую камеру.

Для входа или выхода из рабочей камеры, а также для удаления грунта и введения различных материалов и инструментов пользуются *шлюзовыми камерами*.

Предположим, нужно проникнуть в рабочую камеру. Для этой цели открывают дверь *b* и входят в шлюз (левый, на рис. 159), закрывают затем эту дверь и открывают кран 2, соединяющий шлюз с шахтной трубой. В шлюз постепенно врывается сжатый воздух. Когда давление в нем устанавливается такое, как в шахтной трубе, открывают дверь *a* и входят в рабочую камеру. Для выхода из кессона служит второй шлюз (правый). Рабочие по шахтной трубе достигают двери с этого шлюза и входят в него при закрытой двери *d*. Затем дверь с закрывают и открывают кран 3, сообщающий шлюз с наружным воздухом. Давление в шлюзе сравнивается с атмосферным, открывают наружную дверь *e* и выходят из кессона.

Наибольшая глубина погружения кессона считается 35 м, при этой глубине необходимо давление сжатого воздуха в 3,5 атмосф. рр.

Работа компрессора должна быть вполне исправной, так как в противном случае возможны крупные несчастия.

§ 133. Пневматическая почта. ¹ Сжатый воздух с успехом применяется во многих городах для быстрой пересылки почты из одних частей города в другие. Пневматическую почту имеют: Лондон, Париж, Вена, Берлин, Гамбург и многие другие города.

Между отдельными почтовыми контролями проложены железные трубы с внутренним диаметром обычно в 6,5 см. В трубу вводится почтовый поезд, состоящий из 10—12 коробок, снабженных кожаными кожухами, в которые укладываются письма, небольшие посылки и проч. Поезд оканчивается *гонком*—деревянным, обитым кожей, цилиндром, плотно прилегающим к стенкам трубы (остальные

коробки прилегают к трубе неплотно, вследствие чего сильное трение происходит только у одного гонка). Открывая кран от резервуара со сжатым воздухом, заставляют его проникать в трубу, он производит давление на гонка и быстро гонит поезд до следующей станции. В Берлине между 7 час. утра и 10 час. вечера отправление поездов с письмами производится не реже 4 раз в час из каждой почтовой конторы.

§ 134. Применение сжатого воздуха для подъема жидкостей. Водоподъемная труба (рис. 160) опускается в буровую скважину, к ее нижней части на глубине ниже уровня воды присоединяется воздухопроводная труба несколько меньшего диаметра, ведущая к компрессору.

Сжатый воздух, входя в трубу, смешивается с водой. Подобно тому как в сообщающихся сосудах более легкая жидкость стоит на большей высоте, так и при откачке воды указанным способом более легкая смесь воздуха и воды поднимается до тех пор, пока давление ее не сравняется с давлением воды в скважине.

Для успешной работы насосов подобного рода необходимо, чтобы воздух возможно лучше смешивался с водой; поэтому воздухоподводящая труба часто оканчивается длинным муфштуком, входящим внутрь водоподъемной трубы и имеющим множество маленьких отверстий, из которых выходит воздух, образуя мелкие пузырьки.

Изображенный на рис. 160 насос носит название *насоса Мамута*. Установки подобного рода применяются также для откачивания нефти и других жидкостей.

¹ Приборы, работающие сжатым воздухом, часто именуются *пневматическими*.

§ 135. Пневматические инструменты. Из пневматических инструментов особенно важны пневматические зубила и молотки.

Пользование пневматическим зубилом во много раз облегчает работу. Достаточно только указать, что сжатый воздух автоматически производит до 4000 ударов зубилом в течение 1 минуты.

Внутри зубила имеется цилиндрический широкий канал, по которому ходит назад и вперед поршень. Сжатый воздух от компрессора или резервуара поступает

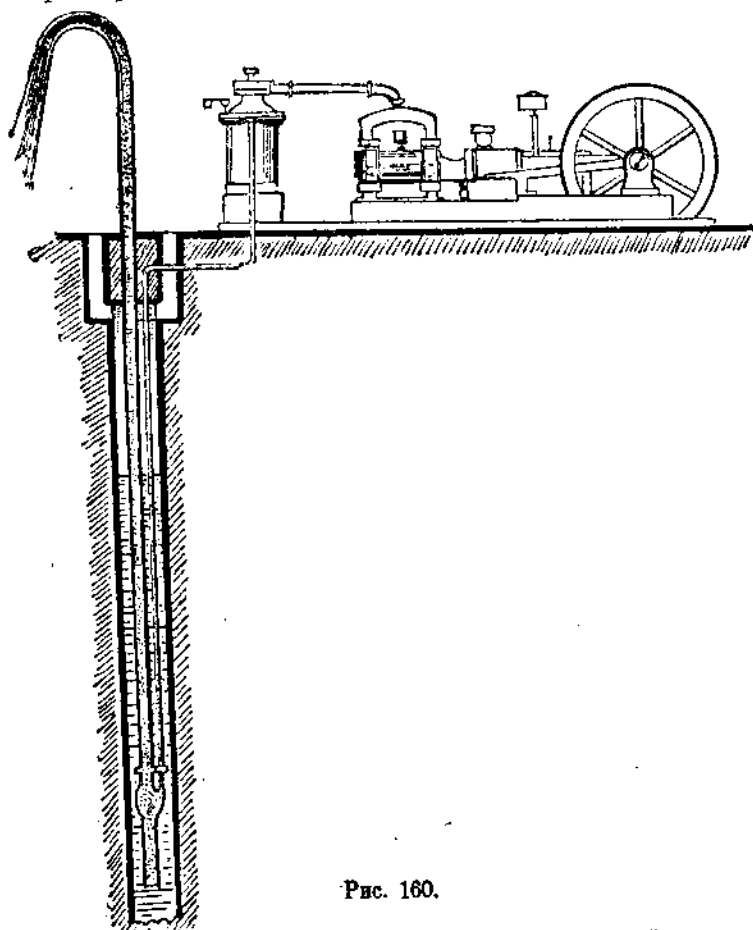


Рис. 160.

в цилиндр и с помощью особого приспособления — золотника, действующего автоматически, входит то с одной, то с другой стороны поршня; при своем движении этот поршень ударяет в зубило.

Пневматические молоты, пневматические сверла и другие инструменты, работающие сжатым воздухом, получают все более и более широкое применение как для ручной, так и для машинной работы.

§ 136. Сжатый воздух в железодельном, литейном и горном деле. В особых печах, называемых доменными, производят выплавку чугуна из руды. Для исправной работы подобного рода печей необходим постоянный приток воздуха, который обычно подводится к топке с помощью воздуходувных труб, идущих от компрессоров того или иного устройства.

При производстве отливок из чугуна также пользуются особыми печами (вагранками), для действия которых в свою очередь необходим приток воздуха.

Различного рода операции в литейном деле, как, например, изготовление шаб-лонов, в которых делаются отливки, очистки самих отливок и т. д. также производятся с помощью сжатого воздуха.

Наконец, при выплавке стали и железа из чугуна, производящейся в настоящее время почти исключительно по способу Бессемера, нельзя обойтись без сжатого воздуха. По способу Бессемера чугун расплавляется в особом конверторе, и через него прогоняется воздух, сжатый до 3 атмосфер; при этом углерод и различные примеси, соединяясь с кислородом воздуха, сгорают, образуя всплывающие наверх соединения (шлаки), чистый же металл выпускается через особые отверстия в нижней части.

В горном деле сжатый воздух также получил широкое применение. При разработке горных пород высверливают в них углубления, называемые *шпурами*, закладывают туда взрывчатые вещества, которые во время взрыва отрывают куски добываемой породы. Эти углубления в настоящее время чаще всего высверливаются пневматическими сверлами.

Для перевозки по галлерейм шахт каменного угля и других полезных ископаемых приходится пользоваться *локомотивами*, работающими сжатым воздухом. Как известно, в шахтах скопляется значительное количество горючих газов, которые могут легко воспламениться и вызвать катастрофу, если воспользоваться тепловым или электрическим двигателем (воспламенение может произойти вследствие электрических искр).

Вместо парового котла, локомотив, работающий сжатым воздухом, имеет резервуар, в который накачивается с компрессорной станции сжатый воздух с давлением до 200 атмосфер. Из резервуара сжатый воздух поступает в особый распределительный механизм — золотник того же типа, как у паровоза (с ним мы познакомились в следующем разделе), и входит в цилиндр то с одной, то с другой стороны поршня, приводя локомотив в движение.

Одного заряда резервуара с сжатым воздухом обычно хватает на несколько часов, после чего производится вторичная зарядка и т. д.

§ 187. Мины Уайтхеда. Все, вероятно, слышали о *минах Уайтхеда*, которые получали такое широкое распространение на войне, но не все, конечно, знают,



Рис. 161.

что эти мины приводятся в движение сжатым воздухом. На рис. 161 представлен внешний вид мины Уайтхеда.

Подводная лодка или миноносец, находясь на расстоянии от 1 до 4 километров от неприятельского судна, пускает в него мину, которая плывет, будучи приведена в движение собственным пневматическим механизмом, и производит взрыв при ударе о корпус судна.

Передняя часть мины заполнена взрывчатым веществом и снабжена ударным приспособлением, производящим взрыв.

В середине помещается резервуар со сжатым до 150 атмосфер воздухом. При выстреле край резервуара открывается и сжатый воздух приводит во вращение гребной винт, дающий мине поступательное движение в воде. На глубине 1,5 — 4,5 м мина движется со скоростью около 10,5 м в секунду.

§ 188. Другие применения сжатого воздуха. Среди прочих многообразных применений сжатого воздуха укажем на *автоматические тормоза железнодорожных поездов, пневматические ручья, воздушные звонки и др.*

До введения автоматических тормозов, приводимых в действие сжатым воздухом, в поездах применялись исключительно ручные тормоза, которые обладали многими существенными недостатками (небольшая сила торможения, неравномерность действия отдельных тормозов и т. д.).

Из пневматических тормозов наибольшее распространение получил *тормоз Вестингауза*.

На паровозе устанавливается воздушный нагнетательный насос, приводимый движением давлением пара. Сжатый воздух собирается в резервуар, расположенный под площадкой машиниста. От этого резервуара идет трубопровод под всем поездом. После сцепки вагонов машинист поворотом рукоятки крана пускает сжатый воздух из резервуара в трубопровод. Под каждым вагоном находится тормозный аппарат, состоящий из вспомогательного воздушного резервуара, тормозного цилиндра, ряда клапанов, рычагов и тяг, приводящих в движение колодки. Сжатый воздух из воздухопровода заставляет клапаны автоматически повернуться таким образом, что он попадает только в вспомогательные резервуары под вагонами.

Если же машинист выпустит часть воздуха из воздухопровода, давление в нем уменьшится и клапаны автоматически повернутся таким образом, что воздух из вспомогательного резервуара устремится в тормозный цилиндр, тормозные колодки прижмутся к бандажам колес и произойдет торможение поезда. В каждом вагоне имеется несколько рукояток, окрашенных в красный цвет и завязанных веревкой с plombой.

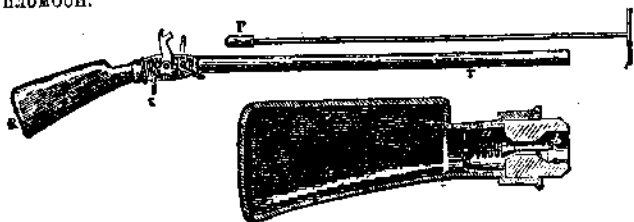


Рис. 162.

В случае какого-нибудь несчастия достаточно разорвать веревку и повернуть рукоятку — при этом воздух выйдет из трубопровода и произойдет торможение. При разрыве поезда обрывается также и трубопровод, что вызывает автоматическое торможение.

На рис. 162 изображено *духовое ружье*. Оно состоит из цилиндрического ствола *T*, соединенного посредством открывающегося внутрь клапана с полым прикладом *K*. Вдвигая в цилиндр шомпол *P*, оканчивающийся поршнем, нагнетают в полость приклада воздух. После нескольких нагнетений воздух в прикладе настолько сжимается, что ружье становится готовым к выстрелу. Заряжая ружье духей, нажимают на собачку *S*, при этом из приклада вырывается струя сжатого воздуха, которая и выбрасывает пулю.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ.

ЗАКОН АРХИМЕДА.

§ 139. Давление жидкости на погруженное в нее тело. Проделайте такой опыт; возьмите технические весы, к одной из чашек подвесьте твердое тело и уравновесьте его гирями на другой чашке (рис. 163). Затем возьмите стаканчик с водою и подведите его под тело таким образом, чтобы оно погрузилось в воду. Тотчас же вы заметите, что равновесие нарушилось — тело, погруженное в воду, стало легче, оно потеряло в своем весе. Начните снимать гирьки до тех пор, пока равновесие снова восстановится. Снятые гирьки покажут нам, сколько потеряло тело.

Предположим, тело потеряло в весе 50 г.

Стаканчик с водой, в который мы погружали тело, рекомендуется взять с делениями на см^3 . Положим, до опускания в него тела вода доходила до деления 100 см^3 . После погружения тела вода поднялась до черты, отмеченной 150 см^3 . Таким образом, тело вытеснило 50 см^3

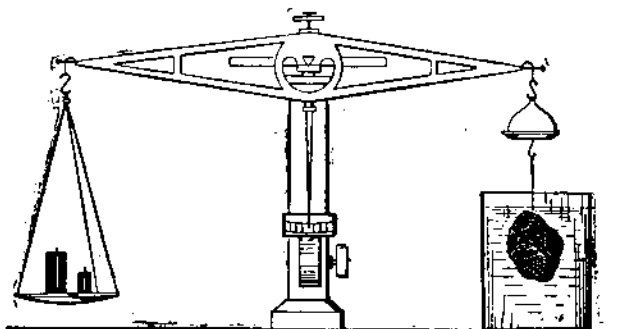


Рис. 163.

воды, а следовательно оно имеет объем 50 см^3 . К какому же выводу мы пришли? Тело, имея объем 50 см^3 , при погружении в воду потеряло в своем весе 50 г . А так как каждый см^3 воды весит 1 г , то вытесненные телом 50 см^3 воды имеют вес 50 г . Итак, *тело, погруженное в воду, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им вода.*

Прodelайте подобные опыты с телами различной формы, погружая их в разнообразные жидкости, и вы всегда получите аналогичный результат.

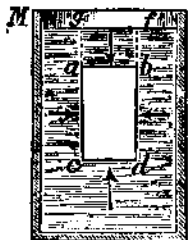


Рис. 164.

Попробуем теперь те выводы, в которых мы пришли исключительно опытным путем, подтвердить ссылкой на известные уже нам истины.

Пусть тело $abcd$ погружено в жидкость (рис. 164). Давления жидкости на боковые стороны ac и bd равны и прямо противоположны, вследствие чего они взаимно уравновешиваются. Давление P_1 на верхнее основание ab измеряется произведением площади его S на высоту h_1 столба жидкости $gabf$ и на удельный вес жидкости d :

$$P_1 = Sh_1 d$$

и направлено сверху вниз.

Давление P_2 на нижнее основание cd направлено снизу вверх и равно:

$$P_2 = Sh_2 d,$$

где h_2 — глубина погружения нижнего основания cd , т. е. высота столба жидкости $gcdf$.

Равнодействующее давление P будет равно разности $P_2 - P_1$ и направлено снизу вверх:

$$P = P_2 - P_1 = Sh_2 d - Sh_1 d = S(h_2 - h_1) d.$$

Но $(h_2 - h_1)$ есть высота тела $abcd$, т. е. h :

$$P = Shd.$$

— есть объем тела v :

$$P = vd.$$

Итак, погруженное в жидкость тело испытывает давление снизу вверх, равное весу жидкости в объеме тела, а следовательно теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

Это положение носит название закона Архимеда

§ 140. Вес, потерянный телом, приобретается жидкостью. На одну из чашек весов поставьте стакан с делениями, наполненный водою до определенной черты, и уравновесьте гири на другой чашке (рис. 165). Погрузите затем в воду какое-нибудь тело, но таким обра-

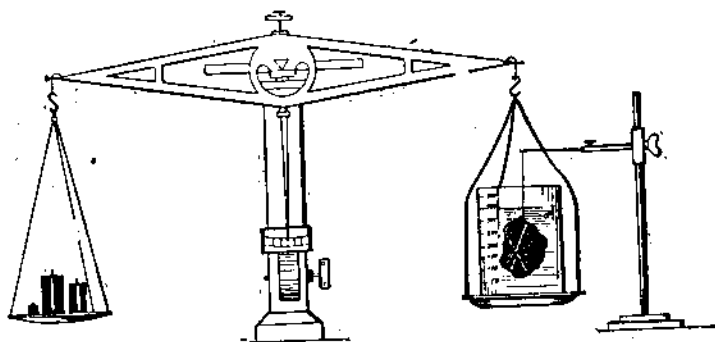


Рис. 165.

зом, чтобы оно не касалось ни дна, ни стенок сосуда. По повышению уровня воды в стакане легко определить объем тела. Равновесие нарушится, чашка с сосудом перетянется.

Как только мы с помощью пипетки удалим из сосуда количество воды, равное объему погруженного в нее тела, равновесие снова восстановится.

Произведем ряд подобных опытов с различными жидкостями, мы придем к выводу, что вес, потерянный телом, приобретается жидкостью.

Нельзя ли это доказать с помощью третьего закона Ньютона (действие равно и прямо противоположно противодействию)?

§ 141. Закон Архимеда применим и к газам. Рассуждения, приведенные нами при разъяснении закона Архимеда, остаются, конечно, в силе и по отношению к газам, так что закон Архимеда применим и к газам.

Всякое тело, взвешенное в воздухе, теряет следовательно часть своего веса, равную весу вытесненного воздуха.

Для подтверждения опытным путем применимости закона Архимеда к газам, воспользуйтесь следующим опытом. Возьмите маленькие весы, к одному концу коромысла подвесьте кусок пробки, к другому

металлическую гирьку таким образом, чтобы в воздухе было равновесие (рис. 166). Поставьте затем весы под колокол воздушного насоса и начните выкачивать воздух — равновесие тотчас же нарушится, пробка перетянет. Так как объем пробки больше, чем объем гирьки, то, очевидно, вытесненный пробкой воздух весит больше, чем вытесненный гирькой. При разрежении воздуха потерянный вес возвращается к телам, и пробка перетягивает.

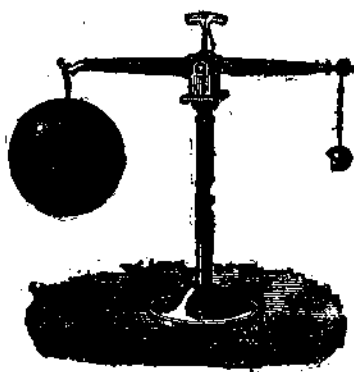


Рис. 166.

Что произойдет, если наши весы, уравновешенные в воздухе, поместить в пространстве, занятое каким-нибудь более тяжелым газом (например, углекислым газом) или более легким (хотя бы водородом)?

§ 142. Определение удельного веса тел гидростатическим взвешиванием. Предположим, вам дали твердое тело, удельный вес которого требуется определить. Сначала взвесьте его в воздухе (пусть это тело весит 156 г), затем погрузите его в воду и взвесьте вторично (136 г). Потеря веса в воде ($156 - 136 = 20$ г) даст вес воды в объеме тела. Так как каждый кубический сантиметр воды весит 1 г, то потеря веса в воде (в граммах) численно равна объему тела (в кубических сантиметрах).

Следовательно $\frac{156}{20} = 7,8$ г/см³ будет искомый удельный вес.

Обозначим вес тела в воздухе через P граммов, в воде — через Q граммов. Удельный вес d может быть найден по формуле:

$$d = \frac{P}{P - Q}.$$

Если нужно определить удельный вес жидкости, то следует взять какое-нибудь твердое тело и взвесить его три раза: 1) в воздухе (положим, 250 г), 2) в воде (200 г) и 3) в испытуемой жидкости (210 г).

Потеря веса тела в испытуемой жидкости ($250 - 210 = 40$ г) даст, согласно закону Архимеда, вес этой жидкости в объеме тела.

Потеря веса тела в воде ($250 - 200 = 50$ г) даст вес воды в объеме тела, численно равный объему тела.

Удельный вес выразится отношением веса жидкости (40 г) к ее объему (50 см³):

$$d = \frac{40}{50} = 0,8 \text{ г/см}^3.$$

Пусть вес тела в воздухе равен P граммам, в воде — Q граммам, в испытуемой жидкости — R граммам, тогда

$$d = \frac{P - R}{P - Q}.$$

При взвешивании в воздухе происходит потеря веса, равная весу воздуха в объеме тела. Этой потерей мы пренебрегали; при более точных работах следует вводить соответствующие поправки.

§ 143. Случай погружения твердых тел в жидкости. На погруженное в жидкость тело действуют две силы: 1) вес тела, который направлен вертикально вниз, и 2) равнодействующая давления жидкости, направленная вертикально вверх. На рис. 167 первая сила обозначена S , а вторая — R .

В том случае, когда вес тела больше, чем давление со стороны жидкости, то тело *тонет*, если же, наоборот, вес тела меньше давления жидкости, то тело *всплывает*. В случае, когда обе указанные нами силы равны, *тело не всплывает, и не тонет, находясь в равновесии внутри жидкости*; таким образом, если

$S > R$ — тело тонет;

$S = R$ — находится внутри жидкости в равновесии;

$S < R$ — всплывает.

Таким образом, для выяснения вопроса о том, будет ли некоторое тело плавать в данной жидкости или нет, нужно сравнить вес этого тела (S) с весом вытесненной жидкости (R) и воспользоваться приведенной выше таблицей.

Но вес тела (S) измеряется произведением его объема v на удельный вес d_1 :

$$S = vd_1.$$

Аналогично, вес жидкости в объеме тела (R):

$$R = vd_2,$$

где v — объем тела, а d_2 — удельный вес жидкости

Так как у S и R имеется по равному множителю, то соотношение между ними обуславливается только соотношением удельных весов d_1 и d_2 и если:

$d_1 > d_2$ — тело тонет;

$d_1 = d_2$ — находится в безразличном равновесии;

$d_1 < d_2$ — всплывает.

Тонет ли железо ($d_1 = 7,8$) в воде ($d_2 = 1$)? Конечно тонет, так как $d_1 > d_2$.
Тонет ли оно в ртути ($d_2 = 13,6$)? Нет, ибо $d_1 < d_2$.

Удельный вес человеческого тела в среднем $1,05 \text{ г/см}^3$. В пресной воде ($d_2 = 1 \text{ г/см}^3$) человек тонет, если же приготовить крепкий раствор соли с удельным весом большим $1,05 \text{ г/см}^3$, то человек в нем не потонет.

§ 144. Плавание тел. Зададимся теперь целью вычислить, какая часть плавающего тела бывает погружена в жидкость, а какая находится над ее поверхностью. Предположим, мы имеем кусок дерева объемом 1000 см^3 , удельный вес которого равен $0,75 \text{ г/см}^3$. Требуется узнать, какая часть этого куска будет находиться над поверхностью воды.



Рис. 167.

На этот кусок дерева действуют две силы: 1) вес (S) и 2) давление воды, вытесненной его погруженной частью (R).

Но $S = vd_1 = 1000 \times 0,75$, а $R = xd_2 = x \times 1$, где x — объем погруженной в воду части куска.

В случае равновесия вес тела равен давлению вытесненной им жидкости, т. е. $S = R$ или в нашем случае:

$$1000 \times 0,75 = x \times 1:$$

$$x = 750 \text{ см}^3.$$

Решая задачу в общем виде, получим:

$$vd_1 = xd_2;$$

$$x = v \frac{d_1}{d_2}$$

Т. е. объем погруженной в жидкость части тела равен всему его объему, помноженному на отношение удельного веса тела к удельному весу жидкости.

§ 145. Ареометры. Если мы одно и то же тело станем погружать в различные жидкости, то в каких из них (более тяжелых или более легких) оно погрузится глубже?



Рис. 168

Обратимся к формуле, выведенной выше. Очевидно, что x , т. е. объем погруженной части тела, тем больше, чем меньше d_2 , т. е. в более легкой жидкости то же тело погружается глубже, чем в более тяжелой.

Рис. 168 изображает весьма распространенный и очень простой прибор для определения удельных весов жидких тел, называемый *ареометром*.

Стеклянный поплавок с грузом в нижней части погружается в воду; в том месте, против которого придется уровень воды, ставят 1,00, затем его погружают в жидкость с удельным весом 0,90 — против нового уровня, ставят 0,90 и т. д.

Когда деления нанесены (их обычно отмечают на полоске бумаги, помещаемой внутри ареометра), прибором можно пользоваться для нахождения неизвестных удельных весов жидкости. Нужно погрузить ареометр в испытуемую жидкость и посмотреть, против какого деления придется ее уровень.

При точных измерениях удельных весов обычно пользуются целым набором ареометров (на одном нанесены деления от 0,8 до 0,9 с сотыми и тысячными долями, на другом от 0,9 до 1, на третьем от 1 до 1,1 и т. д.).

В том случае, когда ареометр имеет специальное назначение измерять крепость спирта, раствора соли и т. д., он именуется *спиртометром*, *солеметром* и проч.



Рис. 169.

Деления на шкале спиртометра (рис. 169) наносятся в градусах крепости спирта. Нуль соответствует дистиллированной воде, а 100° — чистому спирту. Погруженный в раствор спирта в воде спиртометр непосредственно указывает на его крепость (так 45-е деление показывает, что в 100 частях этого раствора 45 объемных частей спирта, а остальные 55 частей воды и т. д.).

§ 146. Судоподъемники. Для перевода судов из одного участка реки или канала в другой с различными горизонтами воды вместо шлюзов иногда пользуются *судоподъемниками*. Мы опишем устройство судоподъемника с поплавками, основанного на принципе закона Архимеда.

Судно, идущее из нижнего участка реки или канала в верхний, вводится в особый бассейн и за ним, как в шлюзовой камере, закрываются ворота. Бассейн держится с помощью прочных железных стоек на поплавах. Эти поплавы внутри пустые, они вытесняют громадное количество воды и рассчитаны таким образом, что вес всего бассейна с водою, стоек и самих поплавков уравнивается весом вытесненной ими воды. Каждый поплавок (на рис. 170 они отмечены буквами Р) находится внутри отвесной шахты.

Когда судно входит в бассейн, за ним закрываются ворота бассейна № 2, а также закрываются ворота № 1, отгораживающие канал от судоподъемника. В шахты опускается вода из верхнего участка канала, уровень ее поднимается, а вместе с ним поднимаются поплавы и бассейн. Когда бассейн достиг до верхнего горизонта, открываются ворота № 3 и № 4 и судно переходит в верхний участок.

При переводе судна из верхнего участка в нижний поступают точно так же. Удаляя воду из шахт, т. е. выпуская ее в нижний участок канала, заставляют понижаться горизонт воды в них, это вызывает постепенное опускание поплавков в бассейне с судном.

Интересно отметить, что вес бассейна с судном и без судна остается одним и тем же. Когда в бассейн входит судно, оно вытесняет количество воды, равное объему погруженной в воду части судна. Вес этой воды, согласно закону Архимеда, как раз равен весу судна. Избыток воды втекает из бассейна назад в канал и, таким образом, вес бассейна не изменяется.

Чтобы движение бассейна было возможно более плавным, устроена целая система направляющих реек, по которым и скользит бассейн без толчков и раскачивания находящегося в нем судна.

§ 147. Сухой пловучий док. Для ремонта судов часто пользуются сухими пловучими доками. Чтобы ввести судно в док, в пространство АА выпускается вода, док погружается в воду и судно входит в него (рис. 171). Затем вода из пространства АА вытесняется сжатым воздухом и док всплывает вместе с находящимся внутри него судном.

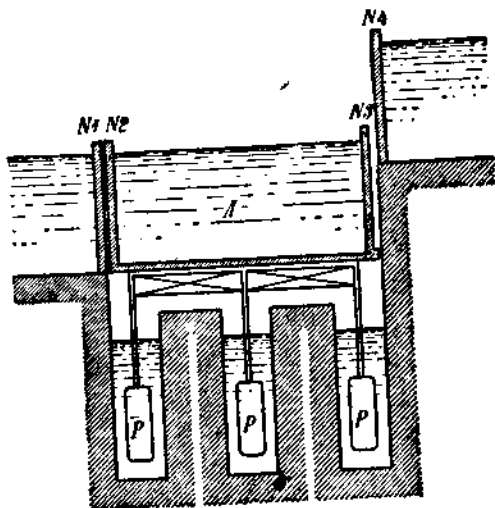


Рис. 170.

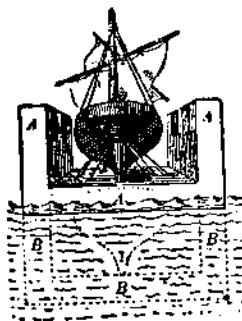


Рис. 171.

По окончании ремонта в пространство АА вновь впускается вода, док погружается в воду и судно выходит из дока, а в него вводится новое судно, ожидавшее ремонта.

§ 148. Задачи. 208. Кусок железа весит в воздухе 156 граммов. Каков будет его вес в воде? Удельный вес железа $7,8 \text{ г/см}^3$.

209. Сколько весит кусок меди объемом 30 см^3 в воде? Удельный вес меди $8,8 \text{ г/см}^3$.

210. Найдите удельный вес тела, если в воздухе оно весит 235 граммов, а в воде 141 г.

211. Чтобы определить удельный вес жидкости, твердое тело взвесим три раза: в воздухе — 315 г, в воде — 275 г и в испытываемой жидкости — 283 г. По этим данным найдите удельный вес твердого тела и жидкости.

212. Кусок железа (удельный вес $7,8 \text{ г/см}^3$) весит в воде 204 грамма. Найдите его объем и вес в воздухе.

213. Кусок пробки объемом 200 см^3 плавает в воде. Какая часть этого объема погружена в воду? Удельный вес пробки $0,24 \text{ г/см}^3$.

214. Какая часть куска железа, плавющего в ртути, погружена в ртуть. Удельный вес железа $7,8 \text{ г/см}^3$. Удельный вес ртути $13,6 \text{ г/см}^3$.

215. Цилиндр высотой 30 см в нижней части сделан из железа на 1 см , верхняя часть его деревянная. Удельный вес железа $7,8 \text{ г/см}^3$, а дерева $0,7 \text{ г/см}^3$. На какую глубину погрузится цилиндр в воду?

216. Какую наименьшую груз нужно положить на цилиндр предыдущей задачи, чтобы он опустился на дно? Диаметр цилиндра 2 см .

217. Кусок свинца плавает в ртути. Какая часть его погружена в жидкость?

218. Медный шар весит в воздухе 440 г и 370 г в воде. Имеет ли шар пустоту и каков ее объем?

219. Кусок воска весом 28,95 г, привязан к камню весом 7,95 г. Все это взвешено в воде, причем вес оказался равным 3,9 г. Определить удельный вес воска, если удельный вес камня $2,65 \text{ г/см}^3$.

220. Баржа длиной 20 м и шириной 8 м , приняв на борт 10 лошадей, опустилась в воду на $2,5 \text{ см}$. Определить вес лошадей.

221. Вес судна 3000 тонн. Каков объем его погруженной части в пресной воде? Как изменится этот объем при переходе судна в морскую воду (уд. вес $1,03 \text{ г/см}^3$)?

222. Плот поддерживается 20 бревнами, длиной по 4 м каждое и диаметром торца 20 см . Определить подъемную силу плота, если уд. вес дерева $0,8 \text{ г/см}^3$.

223. Основание парома представляет собою прямоугольный ящик размерами $10 \text{ м} \times 5 \text{ м}$. На сколько увеличится его осадка, когда на паром войдет 20 человек. Вес каждого человека в среднем 65 кг.

224. Сухой док, изображенный на рис. 171, имеет длину 80 м и ширину 20 м . Глубина его осадки, когда пространства АА заполнены воздухом, 30 см . Когда в док ввели судно, осадка дока увеличилась на $1,5 \text{ м}$. Какой вес введенного в док судна?

225. Вес дирижабля со всеми его частями 15000 кг и объем его 22000 м^3 . В камерах дирижабля находится 20000 м^3 водорода. Найти грузоподъемную силу дирижабля, если удельный вес водорода $0,00009 \text{ г/см}^3$.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ.

СУДОСТРОЕНИЕ.

§ 149. Водонизмещение судов. Прежде всего ответьте на вопрос: почему плавают судно?

Сила веса тянет судно вниз, окружающая же жидкость оказывает противодействие, направленное вертикально вверх. При плавании обе силы уравновешивают друг друга, т. е. вес судна равен весу воды, вытесненной его погруженной частью. При нагрузке судно погружается глубже, вытесняя еще некоторое количество воды, вес которой равен весу груза.

О размерах судна судят по его водонизмещению, обычно измеряемому в тон-

вах. Под водоизмещением разумеют вес судна, выраженный в тоннах. Он равен весу вытесненной судном воды.

Так как 1 м^3 воды весит 1 т , то водоизмещение также показывает объем погруженной в воду части судна.

Пусть, например, дано водоизмещение судна 5000 т . Это значит, что оно весит 5000 т и своей погруженной частью вытесняет 5000 т , или 5000 м^3 пресной воды.

§ 150. Устойчивость судна.

Судно должно быть построено таким образом, чтобы оно не опрокидывалось при качке, а держалось на воде устойчиво. Это условие достигается приданием судну соответствующей формы и таких размеров, чтобы глубина погружения при определенной нагрузке была строго определенной.

Выше мы уже говорили, что на судно действуют две силы: 1) вес, приложенный к центру тяжести, и 2) равнодействующая давления окружающей жидкости, приложенная к точке, называемой *центром давления*.

От взаимного положения центра тяжести и центра давления и зависит устойчивость судна.

На рис. 172 показан поперечный разрез судна. Центр тяжести (1) и центр давления (2) находятся на одной прямой. Если судно наклонится, то центр давления переместится в сторону крена и появится вращающий момент, стремящийся вернуть судно в прежнее положение.

Рисунок 173 изображает поперечный разрез судна, форма которого не обеспечивает ему устойчивого положения. При небольшом даже крене центр давления

перемещается в противоположную сторону, и появляется вращательный момент, стремящийся опрокинуть судно.

Точка пересечения осевой линии, проходящей через центр тяжести судна, с направлением действия давления окружающей жидкости (проходящей через центр давления) носит название *метацентра*.

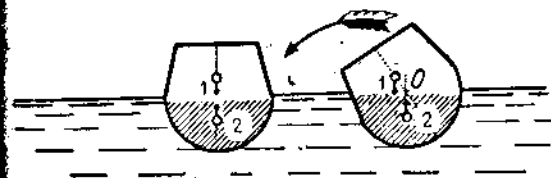


Рис. 173.

При устойчивом положении судна (рис. 172) метацентр лежит выше центра тяжести судна, при неустойчивом равновесии — ниже центра тяжести (рис. 173).

§ 151. Прочность судна. Чтобы плавание на судне было безопасно, необходима достаточная прочность его конструкции.

Следует помнить, что судну не всегда приходится опираться на поверхность воды всем своим основанием; если встречные волны отстоят друг от друга на расстоянии, приблизительно равном длине судна, то оно может быть либо приподнято посередине и остаться без опоры на концах, либо поддерживаться волнами на концах и оставаться без опоры посередине, при этом корпус судна не должен прогибаться, сохраняя свою первоначальную форму.

Чтобы оказать противодействие сильным ударам волн и быть в состоянии выдержать свою громадную тяжесть, имея опору только в нескольких точках, судно должно напоминать конструкцию мостовой фермы.

Вдоль всего судна укладывается прочная стальная балка А (рис. 174), образующая своим нижним основанием киль судна. На некотором расстоянии друг от друга, по обе стороны от нее укрепляются поперечные балки — *нижние шпангоуты*, к которым прикрепляются боковые шпангоуты. Между нижними шпангоутами устанавливаются продольные балки. В результате получается очень прочная конструкция, которая обшивается, кроме того, сверху и снизу рядом сталь-

ных листов. Таким образом, у судна образуется двойное дно, и если во время плавания судно сядет на мель и повредит нижнюю обшивку (нижнее дно), то внутренняя обшивка сможет предохранить его от доступа воды.

Боковые шпангоуты также соединяются между собою рядом продольных балок и обшиваются стальными листами.

Между боковыми шпангоутами устанавливаются еще балки, поддерживающие палубу, которая также обшивается стальными листами. Ряд поперечных и продольных перегородок обеспечивает полную неаменность конструкции. Поперечные перегородки чаще всего делаются водонепроницаемыми, так что если даже вода проникла в одно из отделений, то она не сможет распространиться по всему судну.

В пассажирских пароходах двери в перегородках также делаются водонепроницаемыми и могут быть автоматически закрыты с капитанского мостика. На не-

которых судах в перегородках вовсе не помещают дверей и для перехода из одного отделения судна в другое необходимо предварительно подняться на палубу.

§ 152. Пассажирские суда. В настоящее время для перевозки грузов и пассажиров пользуются почти исключительно пароходами, т. е. судами, приводимыми в движение силой пара.

Первый пароход «Клермон», совершивший удач-

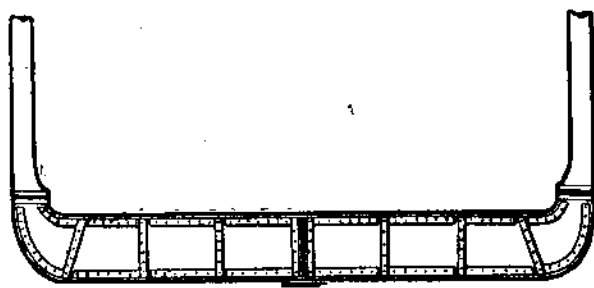


Рис. 174.

ные рейсы, был построен в 1807 году изобретателем Робертом Фультоном. Водоизмещение этого судна было всего только 150 т.

Интересно сопоставить его с современными морскими гигантами, хотя с «Маджестиком», спущенным на воду в 1922 году.

Длина этого судна 291 м, ширина 30,5 м, высота от киля до шлюпочной палубы 31 м, водоизмещение 64000 т, нормальная мощность турбин 66000 л. с., но она может быть доведена до 100000 л. с. Пароход вмещает свыше 4000 пассажиров и отличается богатейшей обстановкой.

§ 153. Грузовые суда. Суда, предназначенные только для перевозки грузов, по своей конструкции отличаются от пассажирских пароходов.

Торговым судам очень часто приходится возить грузы только в одном направлении. Чтобы при возвращении назад судно было достаточно устойчиво, необходимо на него погрузить балласт. Балластом обычно служит вода, которую впускают в пространство между верхней и нижней обшивкой дна. Однако ее для плавания по океану часто бывает недостаточно; при сильном волнении корма судна, вежливо сидящего в воде, может подняться, вант оголится и начнет быстро вращаться; встретив затем при погружении в воду ее значительное сопротивление, он может сломаться.

В некоторых судах наполняют водяным балластом пространство между двойной обшивкой боковых шпангоутов. Есть суда, имеющие особые цистерны для их наполнения в случае надобности водою.

§ 154. Подводные суда. Подводные суда служат почти исключительно для атаки на неприятельские суда во время войны. Применение их в мирной обстановке для изучения жизни обитателей морских глубин очень ограничено. Подводное судно (их обычно называют *подводными лодками*) должно прежде всего отличаться прочностью, так как на значительной глубине, куда ему приходится опускаться, давление воды относительно очень велико (при погружении на каждые 10 м давление возрастает на 1 м; на квадратный сантиметр его поверхности). Что касается устойчивости, то она достигается тем, что центр тяжести судна располагается ниже центра давления.

Большую часть времени подводное судно все же проводит на поверхности воды. Верхняя его поверхность имеет площадку, на которую может выходить ко-

мандир через особый люк, плотно закрываемый при погружении в воду. В нижней части посередине подводного судна имеются особые цистерны, в которые может быть очень быстро впущена через автоматически открываемые боковые отверстия вода. При этом судно делается тяжелее и скрывается под водой. На погружение в воду большие подводные суда требуют 2—2,5 минуты, небольшие подводные лодки могут опуститься под поверхность воды менее чем в 1 минуту.

Для поднятия на поверхность воду из цистерн вытесняют сжатым воздухом. Подводное судно снабжается еще двумя цистернами — у носа и кормы, предназначенными для сохранения правильного продольного положения судна под водой. Если один конец судна перегнет и продольная ось наклонится, особое автоматическое приспособление перекачивает часть воды из одной цистерны в другую и равновесие восстанавливается.

Для дыхания людей, находящихся в подводном судне во время его погружения, пользуются запасом сжатого воздуха или кислорода: продукт же дыхания — углекислый газ — поглощается соответствующими химическими веществами.

Для наблюдения за тем, что происходит над поверхностью воды, пользуются особой вертикальной зрительной трубой (перископ), конец которой возвышается над горизонтом воды. С помощью системы зеркал и стекол можно, находясь в лодке, видеть происходящее над поверхностью воды.

Заметив неприятельское судно, подводная лодка старается незаметно приблизиться к нему и, выпустив мину, бесшумно удаляется.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ.

ВОЗДУХОПЛАВАНИЕ И АВИАЦИЯ.

§ 155. Принцип полета аппарата „легче воздуха“. Подобно тому, как на погруженное в жидкость тело действуют две силы — вес тела и давление окружающей жидкости, так и на всякое окруженное воздухом тело действуют: 1) вес тела и 2) давление воздуха, дающее равнодействующую силу, направленную вертикально вверх и равную весу вытесненного воздуха.

В том случае, когда первая сила больше второй — тело падает; наоборот, однако, тело, весящее меньше, чем вытесненный им воздух, и оно будет подниматься вверх подобно пробке, всплывающей на поверхность воды.

Бесспорно ли будет подниматься такое тело вверх? Конечно, нет.

По мере поднятия воздух делается реже, на некоторой высоте вес тела как раз уравновесится давлением более легкого разреженного воздуха, и дальнейший подъем тела вверх прекратится.

Есть основание предполагать, что первый поднявшийся на воздух на легком шаре, наполненном теплым воздухом, был русский неученый человек, некто подъячий Крякутний. Это было в 1731 году. Однако Крякутний встретил к своим опытам отрицательное отношение властей и народа.

Спустя 52 года, 5 июня 1783 года, во Франции братья Этьен и Жозеф Монгольфье произвели опыт с шаром, наполненным нагретым воздухом. Шар имел диаметр около $1\frac{1}{2}$ м, был сшит из полотняных клиньев, подклеенных бумагой, внизу было кольцообразное отверстие, под которым жигалась с ломом, смешанная с шерстью. Теплый воздух наполнял шар, который летал до тех пор, пока воздух в нем не охлаждался.

Братья Монгольфье неоднократно удачно повторяли подобные опыты с шаром, а 21 ноября 1783 года на таком шаре впервые поднялись люди, которые, пробыв в воздухе около 25 минут, благополучно спустились на землю.

Одновременно с братьями Монгольфье молодой французский физик Шарль стал готовить свои летательные аппараты-шары из прорезиненной особой способом материи, чем достигал непроницаемости ее для газа. Кроме того, он, вместо нагретого воздуха, впервые стал наполнять шары легчайшим газом — водородом.

§ 156. Воздушный шар. Воздушный шар или свободный аэростат представляет собой баллон из прорезиненной материи, наполненный тем или иным, более

легким, чем воздух, газом. В настоящее время чаще всего пользуются для этой цели *светильным газом, водородом или гелием.*

Так как 1 м³ водорода весит 0,09 кг, а куб. метр воздуха (у поверхности земли) имеет вес 1,29 кг, то подъемная сила водорода равна: $1,29 - 0,09 = 1,2$ кг. Подъемная сила гелия: $1,29 - 0,15 = 1,14$ кг, светильного газа: $1,29 - 0,42 = 0,87$ кг.

В нижней части баллона помещается деревянное кольцо, от которого идет труба, сделанная из той же резиновой материи, что и баллон, называемая *аппендиксом*. Аппендикс оканчивается открытым отверстием. Когда шар поднимается на значительную высоту, то он испытывает извне давление меньше, чем бывшее у поверхности земли; внутри же шара давление остается прежним,

и если не оставить отверстия для свободного выхода газа внутрь, то шар может лопнуть.

В верхней части шара прикреплено деревянное кольцо с клапаном, от которого идет веревка внутрь шара, и конец ее опускается в гондолу для пассажиров. В том случае, когда нужно заставить шар несколько снизиться, открывают верхний выпускной клапан, часть газа выходит, шар делается тяжелее и опускается вниз. В том случае, когда нужно быстро выпустить весь газ из оболочки, тянут за другую веревку, привязанную к особому полотняному, приклеенному, а не пришитому к остальной оболочке, и открывают его, выпуская газ.

При полете на воздушном шаре необходимо взять с собою мешки с песком (балласт), при сбрасывании которых шар становится легче и в требуемый момент поднимается вверх.

Баллон покрывается веревочной сетью, к ней подвешивается деревянный обруч М (рис. 175), к которому при помощи тросов прикрепляется гондола (корзинка) для пассажиров, обычно изготовляемая из ивовых прутьев.

К корзине подвешивается длинный канат, называемый *гайдропом*, конец которого во время полета свешивается вниз. При спуске на землю он ослепляет шар, а кроме того, зацепляя за неровности почвы, препятствует волочению шара при ветре.

При полете на аэростатах необходимо брать с собою барометр для определения высоты подъема, компас и некоторые другие приборы.

Обычно размеры свободных аэростатов 300, 600, 900, 1200, 1500, 2000 м³. Подсчитаем, какова подъемная сила аэростата, вмещающего 1500 м³ газа, наполненного водородом, если оболочка и гондола со всеми приборами весит 800 кг. Шар должен подняться до высоты 1000 м.

На этой высоте 1 м³ воздуха весит 1,16 кг. Следовательно подъемная сила 1 м³ водорода равна:

$$1,16 - 0,09 = 1,07 \text{ кг.}$$

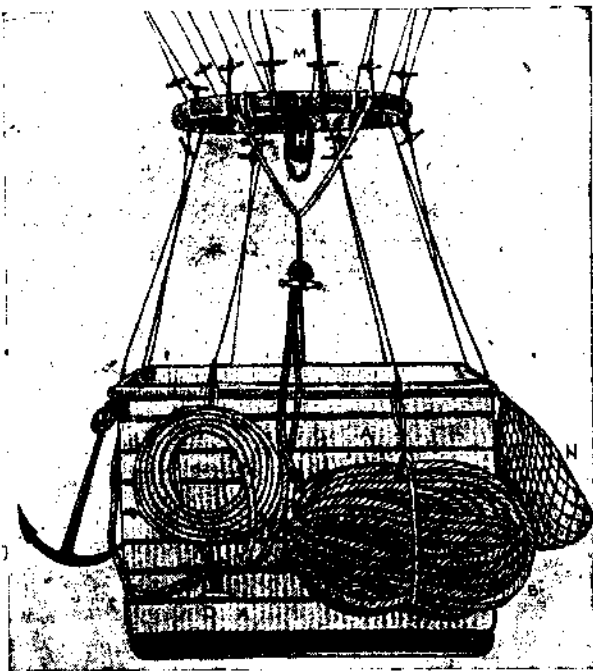


Рис. 175.

Подъемная сила 1500 м².

$$1500 \times 1,07 = 1605 \text{ кг.}$$

Так как оболочка и гондола весят 800 кг, то аэростат может поднять $1605 - 800 = 805$ кг пассажиров и грузов.

§ 157. Привязные аэростаты. Свободные неуправляемые аэростаты в настоящее время почти не употребляются. Для производства различных метеорологических наблюдений, а во время военных действий для корректирования артиллерийской стрельбы, разведки и проч. применяются *привязные аэростаты*. Они представляют собою или воздушный шар обычного типа, привязанный на крепком тросе к определенному месту, или имеют несколько удлиненную форму и снабжены особым стрелком (килем), обеспечивающим аэростату устойчивость. В последнем случае их именуют *змейковыми аэростатами*.

§ 158. Дирижабли (управляемые аэростаты). На протяжении первой половины XIX столетия мы видим целый ряд попыток решить проблему управляемости аэростатов.

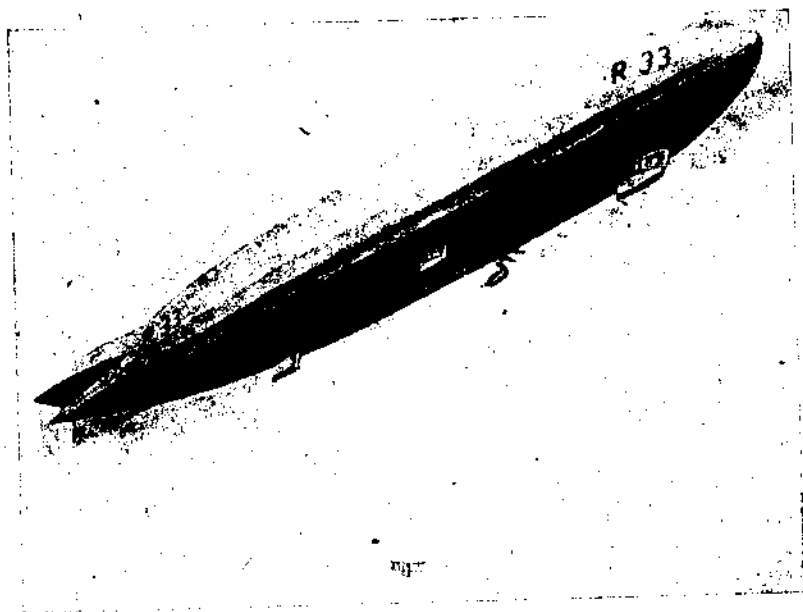


Рис. 176.

Непреодолимым препятствием, задержавшим решение этой важной проблемы, было отсутствие подходящего двигателя — сильного и легкого.

Паровые машины или турбины имеют слишком большой вес, так как сопровождаются громоздким и тяжелым котлом, наполненным водою; кроме того, необходимо брать запас воды и топлива.

Лишь применение двигателей внутреннего сгорания, отличающихся легкостью при большой мощности, окончательно решило вопрос управляемости аэростатов в положительном смысле.

Наибольшее распространение получили дирижабли жесткой системы (см. рис. 176). Они имеют остов, или каркас, сделанный из алюминия или дерева, в форме многогранной призмы с заостренными по концам, на который натягивается оболочка из прорезиненной материи.

Внутри оболочки помещаются несколько отдельных баллонов, наполненных

газом, что, конечно, значительно рациональнее, чем наполнение всей внутренности оболочки, как одного целого, так как при разрыве ее в каком-нибудь одном месте выйдет газ лишь из одного соответствующего баллона, и дирижабль лишится только небольшой части своей подъемной силы; в случае же отсутствия баллонов через отверстие в оболочке выйдет весь газ, заключающийся внутри ее, и дирижабль принужден будет упасть вниз. Для управления служат «руль поворотов» и «руль глубины», представляющие собою: первый — ряд вертикальных плоскостей, а второй — ряд горизонтальных плоскостей, изменением поворота которых можно заставить дирижабль менять свое направление.

Жесткая система дирижаблей обеспечивает им устойчивость и неизменность формы. Однако алюминиевый или деревянный остов столь тяжел, что приходится придавать дирижаблям этого типа громадные размеры, чтобы иметь достаточную подъемную силу, что, конечно, очень удорожает их постройку (так, первый дирижабль этой системы, построенный Цеппелином, имел длину 128 м, при диаметре посередине в 11,7 м; современные же дирижабли достигают длины до 236 м).

Кроме того, недостатком этой системы является трудность хранения подобных гигантов, для чего приходится строить особые *ангары* или *амбары*.

Противоположностью жесткой системы дирижаблей является *мягкая*, или *парселевая*, характеризуемая полным отсутствием жестких частей, вследствие чего дирижабли этого типа обладают значительной грузоподъемностью (нет лишних частей), сборка и разборка их отличается простотой, также перевозка и хранение не представляют затруднений. Прочность и устойчивость их значительно менее таковых у жесткой системы, что и заглавливает отдачу преимуществу этой последней.

Промежуточной формой между этими двумя крайностями являются системы *полужесткая* и *полумякая*.

Размеры современных дирижаблей достигают колоссальной величины. Так, законченный осенью 1928 года дирижабль «L. Z. 127» имеет длину 236 м и объем 105 000 м³. Он построен по проекту и под руководством Эккенера.

§ 159. **Аэропланы.** Хотя конструкция дирижаблей и достигла за последние годы значительного совершенства, но полеты на них с целью перевозки пассажиров не выдерживают конкуренции с более быстрым и удобным способом перелетов на *аэропланах* — аппаратах тяжелее воздуха.

Почему же аэроплан хотя и тяжелее воздуха, имеет возможность держаться над поверхностью земли?

Прежде чем ответить на этот вопрос, вспомним полет воздушного змея, устройство которого должно быть хорошо знакомо учащимся, и разберем силы, действующие на змея.

Здесь на рис. 177 показан змей в том положении, когда он «стоит» в воздухе. На него действуют три силы: вес, который тянет змея книзу (на чертеже обозначено буквой Q), тяга веревки (обозначена T) и давление ветра (P), направленное под прямым углом к его поверхности. Это давление ветра и уравновешивает силы Q и T . Если ветер прекратится, то змей должен упасть вниз. Что нужно сделать, чтобы заставить его держаться в воздухе при отсутствии ветра? Нужно бежать и тянуть за собой веревку. В таком случае змей будет сам давить на воздух и испытывать со стороны воздуха такое же противодействие, которое и даст силу P , необходимую для его поддержания на высоте.

Принцип полета аэроплана (см. рис. 178) тот же, что и змея в случае отсутствия ветра, с той только разницей, что тяга веревкой заменена тягой воздушного винта — пропеллера, приводимого в движение мотором.

При движении аэроплана воздух производит давление на его крылья и поддерживает аппарат.

Разложим силу R (полное сопротивление воздуха) на две составляющие, R_x и R_y , как показано на рисунке. Сила R_y препятствует аэроплану падать вниз, уравновешивая силу веса Q . Сила R_x противодействует силе тяги T .

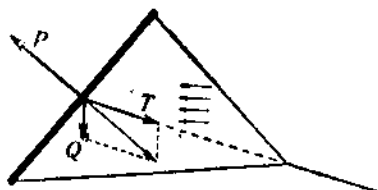


Рис. 177.

Существует много типов современных аэропланов. В зависимости от числа крыльев их можно разделять на *монопланы* (с одной несущей поверхностью, состоящей из двух крыльев, между которыми располагается корпус аэроплана с гондолой, где помещаются летчик, пассажиры и груз, *бипланы* (с двумя параллельными рядами несущих поверхностей) и *трипланы* (три ряда поверхностей).

Внизу корпуса аэроплана помещается *тележка* (*шасси*), которой он опирается на землю. По роду тележки, аэропланы делятся на: а) *колесные*, поднимающиеся с поверхности земли, б) *лыжные*, приспособленные для подъема и спуска со льда или снега, в) *гидроаэропланы*, для подъема с воды, г) *амфибии*, которые могут подниматься и спускаться и с суши и с воды.

Многоразлична служба воздушных судов и в мирной и в боевой обстановке. Они широко применяются для перевозки пассажиров, почты, грузов, для целей агитационного и рекламного характера, для съемок планов и т. д.

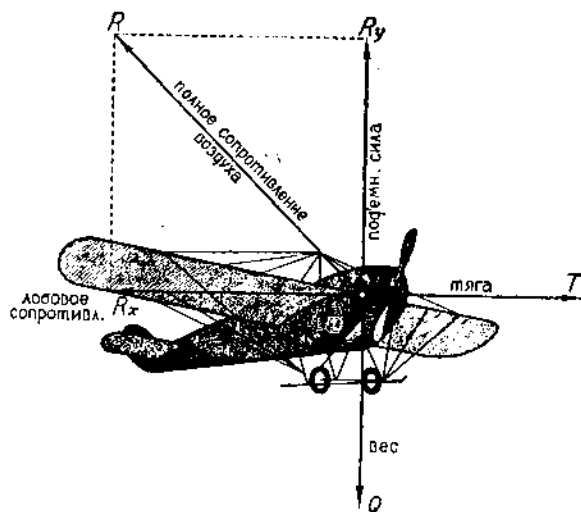


Рис. 178.

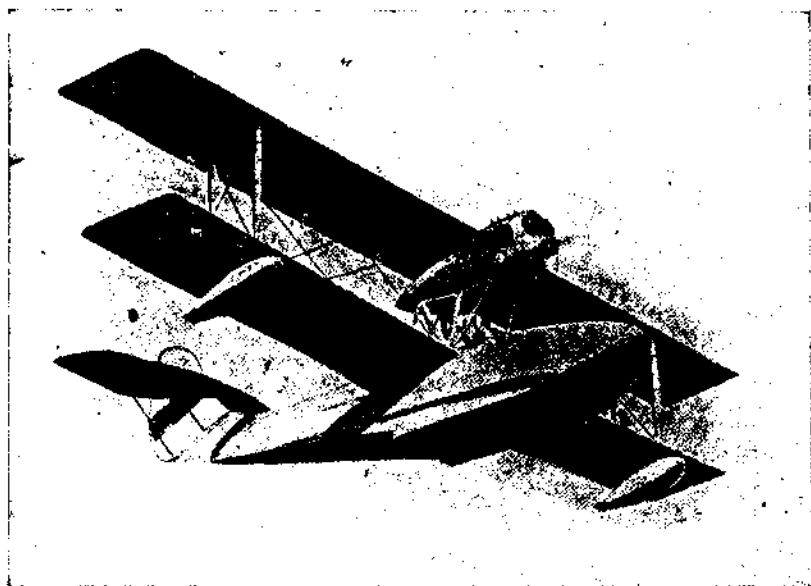


Рис. 179.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ.

ЧАСТИЧНЫЕ СИЛЫ.

§ 160. Понятие о поверхностном натяжении. На рис. 180 изображена масленка с фитилем, предназначенная для автоматического смазывания трущихся поверхностей в машинах. Она состоит из медного сосуда a , в который налито масло. Сквозь канал пропущен фитиль i , погруженный одним концом в масло, а другим соприкасающийся с трущимися и подлежащими смазке поверхностями. Масло поднимается по фитилю i и передается трущимся поверхностям.

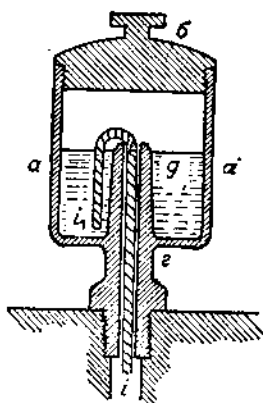


Рис. 180.

Не задавали ли вы себе вопроса, почему масло поднимается по фитилю? Точно так же керосин или спирт поднимается в лампе по светильне, а чернила впитываются промокательной бумагой. Что является причиной этого явления?

Прежде чем ответить на эти вопросы, мы должны будем познакомиться с некоторыми проявлениями сил взаимного притяжения молекул жидкостей. Мы уже отмечали, что между молекулами жидкостей существуют силы сцепления; каждая молекула притягивает к себе окружающие молекулы, но, конечно, силы взаимодействия ослабевают по мере увеличения расстояния между молекулами. Так, молекула a (рис. 181) притягивает к себе молекулу b сильнее, нежели молекулу c , и т. д.; на некотором же расстоянии ее притяжение настолько ослабеет, что его можно без большой погрешности принять за нуль. Около каждой молекулы, как около центра, можно описать сферу радиусом, равным предельному расстоянию, на которое распространяется ее влияние.

Все молекулы, заключенные внутри этой сферы, притягиваются молекулой, находящейся в центре; на молекулы же за пределами сферы ее влияние столь мало, что им можно пренебречь.

Молекула b притягивает к себе молекулу a , но ведь внутри сферы можно найти другую диаметрально противоположную молекулу b_1 , действие которой уравнивает ее влияние, точно так же для молекулы c найдется ей противоположная молекула c_1 и т. д. Словом, влияние всех окружающих молекул на молекулу a дадут равнодействующую, равную нулю. Не то будет, если мы возьмем молекулу k на самой поверхности жидкости. Притяжение молекул нижней поло-

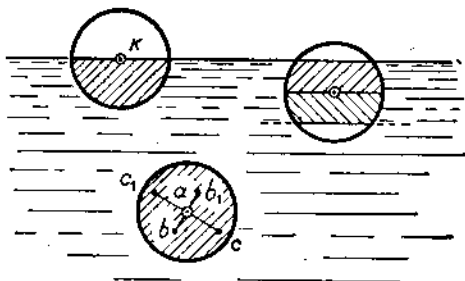


Рис. 181.

вины сферы ничем не уравнивается, и молекула k будет испытывать стремление стянуться внутрь.

То же будет и со всеми молекулами, отстоящими от поверхности жидкости на расстояние меньше радиуса сферы частичного действия.

Итак, поверхностный слой жидкости отличается от всей остальной ее массы. Под влиянием молекулярных сил в поверхностном слое создается особое натяжение, называемое *поверхностным натяжением*. Поверхностный слой, стремясь втянуться внутрь жидкости, образует на ее поверхности уплотнение, пленку. Чтобы разрушить эту пленку, необходимо приложить некоторое усилие.

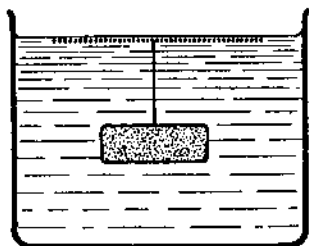


Рис. 182.

Существование поверхностной пленки в жидкостях можно показать на следующем опыте. Если пробку, снабженную сеточкой и плавающую на поверхности воды, прижать пальцем и погрузить в воду, то, всплывая наверх, она встретит на своем пути поверхностный слой воды, и сеточка не сможет прорвать этого слоя (рис. 182). Тонкую иголку можно положить на поверхность воды, и она не потонет, так как силы ее веса будет недостаточно для разрыва поверхностной пленки воды.

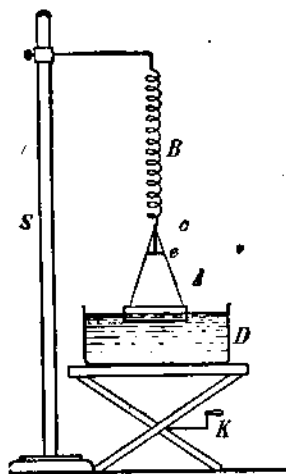


Рис. 183.

§ 161. Величина поверхностного натяжения. Чтобы определить величину поверхностного натяжения различных жидкостей, можно воспользоваться прибором, изображенным на рис. 183.

Кольцо A , подвешенное к пружине B , укрепленной в стойке S , снабжено указателем, с помощью которого можно сделать отсчет по шкале вдоль стойки.

Вращая рукоятку K , поднимают стол, на котором стоит сосуд D с испытуемой жидкостью, так, чтобы кольцо погрузилось своим нижним основанием в жидкость.

Затем медленно вращают рукоятку, опуская стол. Вместе со столиком опускается и погруженное в жидкость кольцо. Непрерывно следят за передвижением указателя. В некоторый момент пружина натянется столь сильно, что кольцо вырвется из жидкости. Отмечают то положение указателя, при котором произошел разрыв. Очевидно, он произошел в тот момент, когда упругости растянutoй пружины было достаточно для разрыва поверхностной пленки жидкости.

Тщательно протерев кольцо, наладывают на чашечку e такое количество равновесок, при котором пружина растянется на то же число делений, на какое она растягивалась для разрыва поверхностного слоя жидкости. Вес гирек таким образом и будет характеризовать силу, потребную для разрыва пленки. Пусть вес этот равен P .

Величина поверхностного натяжения может быть охарактеризована силой, приходящейся на единицу длины линии разрыва. Эта сила носит название *коэффициента поверхностного натяжения*.

Разрыв пленки происходит по наружному и внутреннему периметру кольца, так как жидкость прилипает к кольцу с обеих его сторон, т. е. длина линии разрыва равна

$$\pi D + \pi D_1,$$

где D — наружный диаметр кольца, а D_1 — внутренний диаметр.

Очевидно, коэффициент поверхностного натяжения K может быть найден из формулы

$$K = \frac{P}{\pi D + \pi D_1}.$$

Вот данные о коэффициентах поверхностного натяжения (K) некоторых жидкостей.

Жидкости.	K (при 0°).
Вода	7,6 м/мм
Керосин	3,0 >
Спирт	2,3 >
Эфир	1,9 >

§ 162. Опыт Плато. Результатом существования поверхностного натяжения является стремление жидкости как бы втянуться внутрь, т. е. занять наименьшую поверхность. Упругая пленка, как резина, обтягивает жидкость и заставляет ее занять наименьшую поверхность.

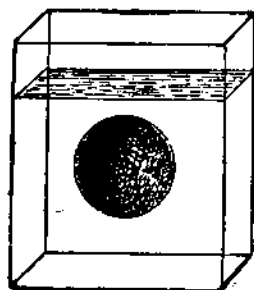


Рис. 184.

Физик Плато произвел такой опыт: он брал сосуд с раствором спирта в воде, обладавшим удельным весом $0,9 \text{ г/см}^3$ и вливал туда прованское масло, имевшее такой же удельный вес. Масло, находясь в безразличном равновесии ($d_1 = d_2$) и не будучи подвержено действию силы тяжести, принимало форму шара (рис. 184). Так как из всех тел, имеющих одинаковый объем, наименьшей поверхностью обладает шар, то вследствие этого жидкость всегда стремится принять форму шара. Сила тяжести противодействует этому стремлению, и, лишь уничтожив ее влияние, как в опыте Плато, мы заставляем жидкость принять форму шара.

Не ответите ли вы теперь на вопрос, почему Солнце, Земля и другие небесные светила имеют шарообразную форму? Почему ту же форму шара имеют капельки дождя, капли разбрызганной ртути?

§ 163. Смачивание и несмачивание. Мениски. Когда мы погружаем в жидкость то или иное твердое тело, мы заставляем соприкасающиеся с ним молекулы жидкости испытывать две силы: 1) притяжение твердого тела (P), 2) притяжение окружающих молекул (Q).

В том случае, когда преобладает сила P , молекулы жидкости прилипают к твердому телу, и говорят, что жидкость *смачивает* это тело. Если же сила Q больше силы P , молекулы жидкости не прилипают к твердому телу, и говорят, что жидкость его *не смачивает*.

Вода смачивает большинство тел, кроме жирных, смолистых; ртуть, наоборот, смачивает лишь немногие тела, например, олово, цинк. Проведите опыт: опустите палец один раз в воду, а другой раз в ртуть и сравните результат.

Если жидкость смачивает стенки сосуда, то ее поверхность у стенок несколько бывает приподнята, при несмачивании, наоборот, несколько снижена.

Поверхность жидкости в сосуде носит название *мениска*. У воды в стеклянном сосуде мениск следовательно *вогнутый* (рис. 185), а у ртути *выпуклый* (рис. 186).

§ 164. Капиллярность. Теперь мы, наконец, можем ответить на вопросы, которые мы задали в начале этой главы. Почему масло поднимается по фитилю?

Волокна фитиля представляют собою как бы тонкие трубки, а по тонким трубкам смачивающая их жидкость поднимается вверх.

Опустите в сосуд с жидкостью тонкую трубку. Жидкость поднимается у стенок, образуя вогнутый мениск. Стремясь занять наименьшую из возможных поверхностей, она выравнивает внутри трубки свою поверхность, делая ее горизонтальной, и поднимает при этом молекулы, находящиеся посредине трубки. Затем жидкость снова образует вогнутый мениск, вновь приподнимается, выравнивает свою поверхность и т. д.

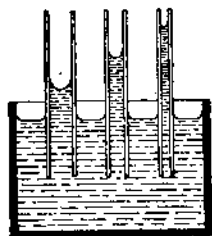


Рис. 185.

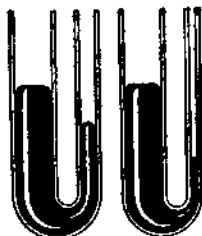


Рис. 186.

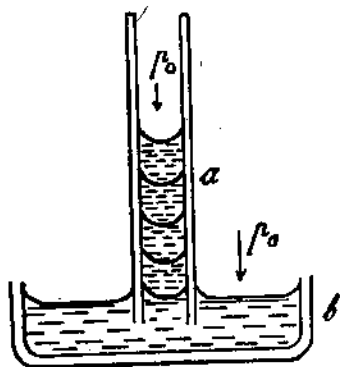


Рис. 187.

(рис. 187). Поднятие будет происходить до тех пор, пока вес поднимаемого столба жидкости не уравнивает силы, действующие на поверхностный слой.

Пусть K — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, смачивающей стенки трубки (рис. 187). Тогда сила, поддерживающая столбик жидкости высотой h , будет равна $2\pi r K$, где $2\pi r$ длина контура, по которому поверхностный слой жидкости соприкасается со стенкой трубки (r — радиус трубки). Эта сила уравнивает вес столбика жидкости, равный $\pi r^2 h d$ (d — удельный вес жидкости).

Таким образом:

$$2\pi r K = \pi r^2 h d,$$

откуда

$$h = \frac{2K}{rd}.$$

т. е. высота поднятия жидкости в тонкой трубке прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения жидкости и обратно пропорциональна удельному весу жидкости и диаметру трубки.

Если опустить в жидкость тонкую несмачиваемую трубку, то жидкость в ней на основании тех же причин опустится. Глубина h , на которую произойдет опускание жидкости, может быть определена также по формуле:

$$h = \frac{2K}{rd}.$$

Тонкие трубки часто называются *капиллярами*, а явление поднятия или опускания жидкости в них именуется *капиллярностью* или *капиллярностью*.

§ 165. Вопросы и задачи. 226. Почему некоторые насекомые могут скользить по поверхности воды, почти вовсе не погружаясь в нее?

227. Наружный диаметр кольца, изображенного на рис. 183, равен 8 см, его толщина 1 мм. Определите коэффициент поверхностного натяжения жидкости, если для растяжения пружины на такое же расстояние, на какое она была растянута для разрыва пленки, пришлось положить груз в 2500 мг.

228. Пружина прибора, изображенного на рис. 183, растягивается на 50 мм под действием груза в 1 г. На сколько должна растянуться пружина, чтобы кольцо вырвалось из воды? Наружный диаметр кольца 70 мм, толщина 1 мм.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ.

ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

§ 166. Понятие о деформации. На скамейку сел человек, скамейка под его тяжестью прогнулась. Канат, к которому подвешен тяжелый груз, заметно удлиняется. *Всякое изменение размеров или формы тела под действием внешних сил носит название деформации.* Таким образом, мы можем сказать, что и скамейка и канат подверглись деформации.

Возьмем стержень и положим его на две опоры, подвешивая к его середине различные грузы. Под влиянием силы веса грузов стержень будет прогибаться. Мы заметим, что при действии небольших грузов, после их удаления стержень начнет выпрямляться, т. е. возвращаться в свое первоначальное положение. Когда же вес груза достигнет некоторой определенной величины, после его удаления мы заметим, что стержень не выпрямится, а останется изогнутым.

Деформации, которые исчезают по прекращении действия деформирующей силы, носят название упругих. Деформации, остающиеся в теле после прекращения действия силы, именуется остаточными.

В технике могут быть допускаемы, конечно, только упругие деформации, так как остаточные деформации влекут за собой искажение формы тела и ослабление его сопротивления внешним силам.

Задачей отдела механики, называемого *сопротивлением материалов*, является расчет внешних сил, действующих на сооружение, и подбор таким образом конструкции сооружения, чтобы обеспечить его от разрушения. Это достигается тем, что рассчитывается каждая часть сооружения таким образом, чтобы вызываемые в ней внешними силами деформации были упругими.

§ 167. Виды деформаций. Все разнообразные случаи деформации тел под действием внешних сил можно свести к следующим основным типам:

1) *Деформация растяжения*, когда внешняя сила вызывает удлинение тела.

2) *Деформация сжатия* — тело под действием силы уменьшает свою длину.

3) *Деформация изгиба* — ось тела изгибается (пример со скамейкой и стержнем).

4) Деформация кручения (рис. 188). При этой деформации поперечные сечения тела поворачиваются относительно друг друга.

5) Деформация срезывания, когда внешняя сила стремится срезать одну часть тела относительно другой. Так, при растяжении двух полос A и B , скрепленных между собою болтом (рис. 189), может произойти срезывание болта по двум плоскостям ab и cd .

§ 168. Деформация растяжения. Для изучения растяжения из испытуемого материала изготавливается стержень с двумя выступами (запловиками) на концах. Одним концом стержень неподвижно закрепляется, к другому концу прикладывается растягивающая сила.

На стержне наносятся две параллельные черты на определенном расстоянии одна от другой. Это расстояние между чертами измеряется каждый раз, когда к телу прикладывается растягивающая сила, с целью выяснить, каково вызванное ею удлинение. После прекращения действия силы вновь измеряется расстояние между чертами, что дает возможность установить, была ли произведенная деформация упругой или остаточной.

Очень удобно деформации изображать графически, откладывая по вертикальной оси нагрузку, а по горизонтальной — соответствующие удлинения (рис. 190).

Опыт показывает, что удлинение, вызываемое растягивающими силами, до некоторых пор возрастает пропорционально величинам этих сил. Так, если под влиянием силы P_1 возникло удлинение a_1 , то под влиянием силы $P_2 = 2P_1$ удлинение a_2 будет равно $2a_1$, и т. д.

Такая связь между удлинением и растягивающей силой имеет место лишь до тех пор, пока растягивающая сила не достигнет некоторой определенной величины P' , соответствующей точке A на графике. При дальнейшем возрастании силы деформации перестают быть упругими, т. е. появляется остаточная деформация, и удлинение начинает возрастать быстрее, нежели растет нагрузка.

Сила P' носит название *предела упругости*.

При дальнейшем возрастании силы, на графике отмечается некоторый перелом в точке B и, наконец, в точке C удлинение начинает расти даже при уменьшении растягивающей силы. На испытуемом

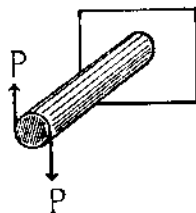


Рис. 188.

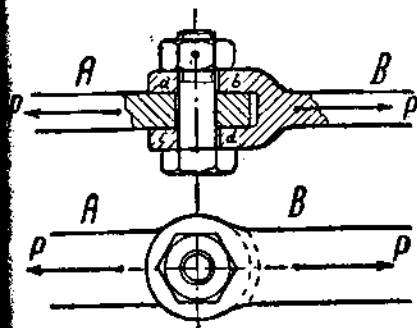


Рис. 189.

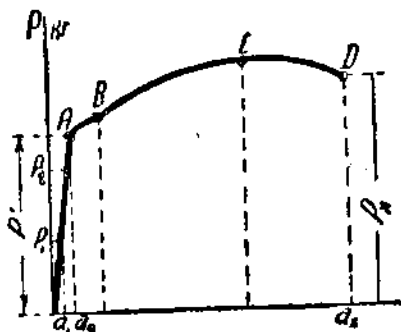


Рис. 190

стержне возникает утонение (образуется шейка), которая делается все тоньше и тоньше, и при некоторой силе P_2 происходит разрыв. Сила P_2 носит название *предела прочности*.

§ 169. Закон Гука. Англичанин Гук во второй половине XVII века первый установил закон о зависимости между растягивающей силой и удлинением.

Будем называть силу, приходящуюся на единицу площади сечения стержня, *напряжением* (p), т. е., если растягивающая сила P кг, а площадь сечения F см², то напряжение

$$p = \frac{P}{F} \text{ кг/см}^2.$$

Отношение удлинения l к первоначальной длине стержня L носит название *относительного удлинения* $\left(\frac{l}{L}\right)$.

Закон Гука можно формулировать следующим образом: пока не превзойден предел упругости, относительная деформация твердого тела пропорциональна деформирующему напряжению:

$$\frac{l}{L} = K \frac{P}{F}.$$

Очевидно, и наоборот: деформирующее напряжение $\left(\frac{P}{F}\right)$ пропорционально относительному удлинению $\left(\frac{l}{L}\right)$. В таком виде формулу записывают чаще. Тогда она имеет вид:

$$\frac{P}{F} = E \frac{l}{L}, \quad (*)$$

где E — коэффициент пропорциональности, называемый *модулем упругости* или *модулем Юнга*.

Он зависит только от материала стержня и от единиц, в которых измеряются P и F . Обычно P измеряют в килограммах, а F — в кв. сантиметрах. В таком случае модуль Юнга выразится в кг/см², так как $\frac{l}{L}$ число отвлеченное.

Зная модуль Юнга, можно решать задачи на расчет удлинений при растяжении тел. Ниже помещается таблица, где приведены значения модуля Юнга для различных материалов.

Пример. На сколько удлиняется стальная проволока длиной 2 м с площадью поперечного сечения 5 мм², если к ней подвешен груз в 250 кг?

Представляем в формулу (*) вместо $P = 250$ кг, $F = 0,05$ см², вместо $E = 2\,100\,000$ кг/см² (из таблицы) и вместо $L = 200$ см:

$$\frac{250}{0,05} = 2\,100\,000 \frac{l}{200}.$$

Откуда

$$l = \frac{250 \cdot 200}{0,05 \cdot 2 \cdot 100 \, 000} \approx 0,48 \text{ см} = 4,8 \text{ мм.}$$

Материал	Модуль Юнга кг/см ²	Предел упру- гости кг/см ²	Предел проч- ности кг/см ²
Сталь инструментальная	2 800 000	5000	7000 — 9500
» мягкая	2 100 000	2500	5000
Железо литое	2 000 000	2000	3400 — 500
» стожженное		1800	3300 — 5000
Латунь	800 000	650	1500
Медь красная	1 150 000	600	2700
Дерево	100 000	—	700
Кирпич	100 000	—	20
Стекло	500 000 — 800 000	—	250

§ 170. Коэффициент безопасности. При расчете необходимых размеров частей сооружений, подвергающихся растяжению, устанавливают наибольшее допускаемое напряжение, которому могут подвергаться эти части сооружений.

Было бы слишком рискованно допускать напряжения, равные пределу прочности или даже пределу упругости, так как 1) всегда могут быть случайные перегрузки частей сооружения, 2) внутри материала могут быть пустоты (раковины) и трещины, 3) с течением времени материал подвергается порче.

Поэтому наибольшее допускаемое напряжение всегда составляет только известную долю предела прочности и бывает значительно меньше предела упругости.

Отношение предела прочности к допускаемому напряжению носит название *коэффициента безопасности*. Допускаемое напряжение для железа ($800 - 1000 \text{ кг/см}^2$) составляет около $\frac{1}{4}$ предельного. Допускаемое напряжение для дерева обычно не превосходит $\frac{1}{8}$ предельного.

Можно сказать, что коэффициент безопасности для железа равен 4, а для дерева 8.

§ 171. Сжатие. Деформация сжатия является обратной деформации растяжения. Пока сжимающее напряжение не превосходит предела упругости, деформация является упругой, при дальнейшем увеличении напряжения деформация становится остаточной, а когда напряжение достигнет предела прочности, происходит разрушение.

Опыт показывает, что значение модуля упругости, предела упругости и предела прочности имеет для одинаковых материалов приблизительно то же численное значение при сжатии, что и при растяжении. Поэтому мы не будем отдельно изучать деформации сжатия, рассматривая ее как *отрицательное растяжение*.

Следует однако иметь в виду, что деформация сжатия часто сопровождается деформацией продольного изгиба, если длина тела значительно превышает его поперечные размеры. Поэтому при расчете тел на сжатие можно пользоваться данными, приведенными для растяжения только в том случае, если размеры тела в направлении сжимающей силы не превышают более чем в 3—4 раза поперечных размеров.

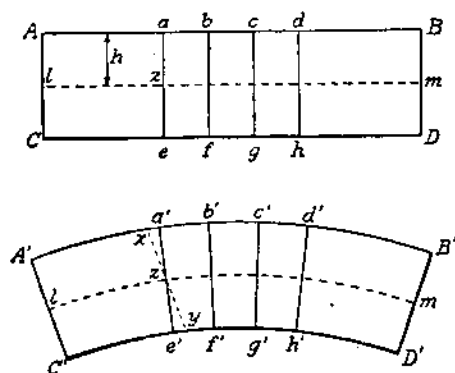


Рис. 191.

Линия lm , вдоль которой расстояния остались без изменения, носит название *нейтральной линии*. Таким образом, мы отмечаем, что волокна бруска, расположенные со стороны вогнутости, *сжимаются*, а со стороны выпуклости *растягиваются*.

Деформация растяжения и сжатия волокон тем больше, чем они дальше отстоят от нейтрального слоя. По закону Гука, напряжение пропорционально вызываемой им деформации. Таким образом, наибольшее сопротивление изгибу оказывают части бруска, наиболее удаленные от нейтрального слоя. Сопротивление же, оказываемое частями бруска, расположенными вблизи нейтрального слоя, ничтожно. Вот почему стараются в частях сооружения, подвергающихся изгибу, главную массу материала расположить возможно дальше от нейтральной линии. Поэтому двутавровая балка (рис. 192) хорошо сопротивляется изгибу, так как у нее несут работу главным образом верхняя и нижняя полки, где сосредоточена наибольшая часть материала.

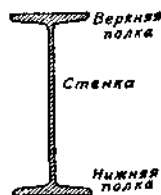


Рис. 192.

§ 173. Задачи. 229. Железный стержень диаметром 4 см и длиной 4 м растягивается силой в 10 т. Определить растягивающее напряжение и удлинение.

230. При какой силе разорвется этот стержень?

231. Какой площади поперечного сечения нужно взять железный прут, чтобы повесить к потолку люстру весом 200 кг, взяв коэффициент безопасности равным 5?

232. Для подъема черпака с углем весом 10 т служит трос, свитый из 20 железных проволок. Каков диаметр каждой проволоки, если коэффициент безопасности принять равным 5?

233. Четыре деревянные круглые колонны поддерживают платформу весом 200 т. Диаметр каждой колонны 20 см. Найти напряжение, испытываемое деревом.

234. Определить деформацию сжатия, полученную колоннами, если длина каждой из них по 2,5 м.

- § 174. Вопросы и задачи для повторения всего отдела. 235. В чем сходство и различие между жидкостями и газами?
236. Как читается закон Паскаля?
237. Чему равно давление жидкости на дно и стенки сосуда?
238. Как располагаются однородные и неоднородные жидкости в сообщающихся сосудах?
239. Цилиндрический сосуд имеет высоту 20 см и радиус основания 10 см. Он наполнен ртутью на $\frac{1}{4}$ своей высоты. Определить давление ртути на дно сосуда?
240. Какое давление производит вода на ворота плузы шириною 2 м и высотой 3 м, верхний край которых лежит ниже уровня воды в реке на 0,5 м?
241. Сосуд имеет в стенке круглое отверстие с диаметром 2 см. К кованому давлению воды на это отверстие, если вода стоит выше его центра на высоте 10 см?
242. Две сообщающиеся трубки наполнены до некоторой высоты ртутью. Если налить в одну из них спирта столько, чтобы ртуть в другой трубке поднялась на 5 см, то какова будет высота столба спирта в другой трубке? (Удельный вес спирта $0,8 \text{ г/см}^3$.)
243. Чему равно атмосферное давление? Опишите опыт Торричелли.
244. Объясните устройство барометров.
245. Давление пара на стенки парового котла может достигать 14 атмосфер. Выразить это давление в килограммах на см^2 .
246. Какую высоту h должен иметь водяной столб и какую h_1 спиртовой для того, чтобы быть в равновесии с атмосферным давлением, когда оно нормальное?
247. Площадь поверхности тела человека среднего роста выражается площадью около 1,5 кв. м. Каково давление воздуха на эту площадь при нормальном атмосферном давлении?
248. Как читается закон Бойля-Мариотта?
249. Объясните устройство водяных и воздушных насосов.
250. Как устроен гидравлический пресс?
251. Объясните действие сифона.
252. В резервуаре находится воздух под давлением 6 атмосфер. Под каким давлением будет находиться оставшийся воздух, если $\frac{1}{2}$ его выйдет из резервуара?
253. Воздух находился под давлением 2 атмосфер и занимал объем 25 л. Какой объем займет он, если давление сделается равным 800 мм?
254. В сосуд с емкостью 2 л накачивают воздух насосом вместимостью 0,5 л. Какую разность давлений воздуха в сосуде после трех ходов накачивания?
255. Из сосуда емкостью в 1 л выкачивают воздух насосом, вместимостью которого 0,4 л. Каково будет давление после трех выкачивающих движений?
256. У рыб, живущих на большой глубине, при быстром извлечении из воды зырь выходит через рот наружу. Объясните это.
257. Отчего при быстром поднятии на большую высоту (при взлете или при спуске на гору) у поднимающихся иногда идет кровь из носа и ушей?
258. Как читается закон Архимеда?
259. Как определяется удельный вес твердых и жидких тел гидростатическим методом?
260. Отчего легко тянуть колодезную бадью, пока она в воде, но когда она выйдет из воды, вес ее тотчас же даст себя чувствовать?
261. На весах уравновешены две гири одинакового веса; одна железная, другая свинцовая. Какая из них переганет, если весы погрузить в воду?
262. Кусок руды весит в воздухе 210 г, в воде 120 г. Найти ее удельный вес.
263. Камень весит в воздухе 416 г, в керосине 284,8 г. Найти удельный вес камня. Удельный вес керосина $0,82 \text{ г/см}^3$.
264. На равноплечем рычаге висят две во всех отношениях одинаковые гири. Что произойдет, если одна будет погружена в воду, а другая в спирт?
265. Применен ли закон Архимеда к газам?
266. Какая часть тела при плавании его погружается в жидкость? Как устроены ареометры?
267. Доска в 8 см толщиной плавает в воде, погружаясь на 5 см под поверхность воды. Найти удельный вес дерева.
268. Кусок металла, удельный вес которого $8,8 \text{ г/см}^3$ весит в воде 390 г. Найти вес в воздухе.

269. К пружинным весам прицеплено ведро, наполненное водой до краев. В воду опускают кусок дерева. Изменится ли показание весов?

270. Что такое возмещение силы?

271. Объясните принцип полета воздушного шара и дирижабля.

272. Объясните принцип полета воздушного змея и аэроплана.

273. Что такое поверхностное натяжение? Как определяется коэффициент поверхностного натяжения?

274. Почему тонкую стальную иглу можно положить на поверхность воды и она не утонет?

275. Какие виды деформаций вы знаете?

276. В чем состоит закон Гука?

277. Что такое модуль Юнга?

278. Что такое коэффициент безопасности?

279. Объясните, в чем состоит деформация изгиба?

280. Какой площади поперечного сечения нужно взять стальную проволоку, чтобы она выдержала груз в 20 кг, если коэффициент безопасности нужно взять равным 4, а предел прочности 8000 кг/см²?

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ.

§ 175. Теплота — один из видов энергии. Изучая различные виды энергии (отдел второй, глава десятая), мы познакомились также и с энергией тепловой. *Технику особенно часто приходится иметь с нею дело.* Вспомните различные тепловые двигатели: паровозы, пароходы, паровые машины и турбины на фабриках и заводах, двигатели внутреннего сгорания, установленные на автомобилях, аэропланах, дирижаблях и подводных лодках, а также получившие широкое применение в мелкой промышленности. Причина работы всех их — тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании топлива.

§ 176. Количество тепла. Представьте себе, что вам приходится подогревать на примусе сосуд с водой. При сгорании керосина выделяется тепло, часть его расходуется на подогревание сосуда и воды в нем, часть нагревает окружающий воздух. Прodelайте такой опыт: налейте в какой-нибудь сосуд небольшое количество воды, имеющей комнатную температуру, положим, пол-литра, возьмите часы и следите, сколько минут пройдет до тех пор, пока вода начнет кипеть. Пусть на это потребовалось 5 минут. Вылейте кипяток остудите сосуд и прodelайте второй опыт. Налейте два литра такой же воды и приступите к ее кипячению. Вы заметите, что кипение начнет происходить минут через 18 — 20. За это время керосину сгорело приблизительно в 4 раза больше, чем при первом нагревании, а следовательно и тепла выделилось во столько же раз больше. Отсюда легко сделать вывод: *для нагревания различного количества воды нужно и различное количество тепла.*

Если бы мы нагревали наши пол-литра воды не до кипения, а всего лишь на 20° — 30° , то на это понадобилось бы не 5 минут, а всего $1\frac{1}{2}$ — 2 минуты, т. е. количество нужного для нагревания тела тепла также зависит и от того, на сколько градусов нам нужно нагреть это тело.

Возьмите теперь вместо воды 2 кг ртути, т. е. столько же, сколько мы брали по весу воды (2 л воды весили 2 кг). Для нагревания этой ртути до 100° , т. е. на такое же число градусов, как и воды, потре-

буется всего около $1\frac{1}{2}$ минут. Итак, различные вещества даже при одинаковом весе и нагревании на одинаковое число градусов требуют различное количество тепла.

Попробуем теперь подвести итог всему только-что нами сделанному.

Во-первых, количество тепла есть некоторая физическая величина, так как она может быть больше или меньше.

Во-вторых, расход тепла при нагревании тела зависит от его веса, числа градусов, на которое это тело надо нагреть, и, наконец, от вещества, из которого оно состоит.

§ 177. Единица количества тепла. Чтобы измерить какую-нибудь физическую величину, пользуются соответствующей единицей измерения. Так, длину мы измеряем метрами, вес тел — граммами, время — секундами и т. д.

Для измерения количества тепла также надо выбрать некоторую единицу, представляющую собой вполне определенное количество тепла, наиболее удобное для сравнения.

За единицу количества тепла принимают тепло, потребное для нагревания 1 кг воды на 1° шкалы термометра Цельсия. Эту единицу называют большой калорией.

Так как при нагревании 1 кг воды от 0° до 1° , от 1° до 2° , от 2° до 3° и т. д. расходуется не вполне одинаковое количество тепла, то за большую калорию обычно принимают $\frac{1}{100}$ того расхода тепла, который имеет место при нагревании 1 кг воды от 0° до 100° . Это будет средняя большая калория.

Небольшой неточностью, происходящей вследствие того, что расход тепла при нагревании воды на каждый градус не на всем протяжении одинаков, мы будем пренебрегать, пользуясь во всех случаях этой средней величиной.

В технике количество тепла всегда измеряют в средних больших калориях. Весьма значительные же расходы и приобретения тепла последнее время стали измерять в термиях:

$$1 \text{ термия} = 1000 \text{ больших калорий.}$$

В тех случаях, когда имеют дело с небольшими количествами тепла, обычно пользуются малыми калориями.

$$1 \text{ малая калория} = \frac{1}{1000} \text{ большой калории.}$$

§ 178. Измерение количества тепла. Подсчитаем теперь, сколько больших калорий тепла мы затратили при нашем опыте для нагревания 2 кг воды от 20° (комнатная температура) до 100° Цельсия.

Чтобы 1 кг воды нагреть на 1° , надо затратить 1 большую калорию; чтобы нагреть 2 кг воды на 1° , надо затратить тепла в два раза больше, т. е. 2 больших калории. Для нагрева же не на 1° , а на 80° ,

т. е. от 20° до 100° , надо тепла в 80 раз больше, т. е. $2 \times 80 = 160$ больших калорий. Для краткости запишем ход решения задачи таким образом:

Чтобы нагреть 1 кг воды на 1° ,	нужно 1 больш. калор.
» » 2 » » 1° ,	» 2 » »
» » 2 » » 80° ,	» 160 » »

Этим способом записи мы и будем пользоваться при всех дальнейших подсчетах.

Решим более сложную задачу. Смешано 10 кг воды при 15° с 3 кг воды при 80° , требуется определить общую температуру.

Горячая вода, соприкасаясь с холодной, охлаждается и отдает ей часть своего тепла. Наоборот, холодная вода повышает свою температуру, получая от горячей некоторое количество тепла. Назовем искомую общую температуру x . Она будет больше 15° , но меньше 80° .

Подсчитаем теперь, сколько больших калорий получила холодная вода, нагреваясь от своей первоначальной температуры 15° до общей температуры x , т. е. на $(x - 15^{\circ})$;

Чтобы нагреть 1 кг воды на 1° ,	нужно 1 больш. калор.
» » 10 » » 1° ,	» 10 » »
» » 10 » » $(x - 15)^{\circ}$,	» $10(x - 15)$ » »

Также легко определить, сколько больших калорий отдала горячая вода, остывая от первоначальной температуры 80° до общей температуры x , т. е. на $(80 - x)^{\circ}$:

1 кг воды, остывая на 1° ,	отдает 1 больш. калор.
3 » » » 1° ,	» 3 » »
3 » » » $(80 - x)^{\circ}$,	» $3(80 - x)$ » »

Если не принимать во внимание потери тепла на нагревание сосуда и окружающего воздуха, то можно написать, что тепло, отданное горячей водой при своем остывании, равно теплу, полученному холодной водой при своем нагревании, т. е.:

$$10(x - 15) = 3(80 - x).$$

Решая это уравнение, имеем:

$$10x - 150 = 240 - 3x;$$

$$10x + 3x = 240 + 150;$$

$$13x = 390;$$

$$x = \frac{390}{13} = 30^{\circ}.$$

Итак, искомая температура равна 30° .

Решим такую же задачу на буквах. Пусть смешано P_1 кг воды при t_1° и P_2 кг воды при t_2° , причем $t_1^{\circ} > t_2^{\circ}$. Требуется определить общую температуру x .

Тепло, отданное водой, имеющей более высокую температуру (t_1°), при ее остывании от первоначальной температуры (t_1°) до общей (x), т. е. на $(t_1 - x)^{\circ}$, оставит:

$$P_1(t_1 - x) \text{ больших калорий.}$$

Тепло, полученное водою, имеющей более низкую температуру (t_2°), при ее нагревании от t_2° до x , т. е. на $(x - t_2)^\circ$, равно

$$P_2(x - t_2) \text{ бол. калор.}$$

Пренебрегая потерей тепла на нагревание сосуда и окружающего воздуха напишем, что тепло, отданное водою, имеющей более высокую температуру, равно теплу, полученному более холодной водою, т. е.:

$$P_1(t_1 - x) = P_2(x - t_2).$$

Решая это уравнение, получим:

$$P_1 t_1 - P_1 x = P_2 x - P_2 t_2;$$

$$P_1 t_1 + P_2 t_2 = x(P_2 + P_1);$$

$$x = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2}{P_1 + P_2}.$$

§ 179. Теплоемкости вещества. Налейте в сосуд 1 кг воды при 80° и опустите туда железную гиру весом в 5 кг при температуре 20° . Горячая вода станет остывать и отдавать свое тепло, железная гиря будет нагреваться. Измерив окончательную температуру воды, мы заметим, что она равна 58° .

Проделайте второй опыт: снова возьмите 1 кг воды при 80° и опустите туда теперь уже не железную, а свинцовую гиру в 5 кг при той же температуре в 20° ; установившаяся температура будет равна 72° .

Какой же вывод мы сможем сделать? Железная гиря весом в 5 кг отняла от горячей воды для своего нагревания значительно больше тепла, чем такая же свинцовая гиря. В первом случае вода остыла на 22° , а во втором случае всего только на 8° .

Вспомним также и наши наблюдения над нагреванием 2 кг воды и такого же количества ртути на одинаковое число градусов. Вода требовала сравнительно много тепла — она нагревалась в течение 20 минут, ртуть же нагревалась через полторы — две минуты.

Итак, различные вещества требуют неодинакового количества тепла для своего нагревания даже в том случае, если их вес и число градусов, на которое их нагревают, одни и те же.

*То количество тепла, которое надо сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1° , носит название теплоемкости вещества.*¹

Вот теплоемкости некоторых веществ:

Алюминий	0,215
Бетон	0,21
Гранит	0,20
Дуб	0,57
Ель	0,65
Железо	0,11
Кирпич	0,19—0,24
Латунь	0,093
Лед	0,50
Медь	0,095
Мрамор	0,21
Никкель	0,115

Олово	0,054
Платина	0,032
Пробка	0,49
Ртуть	0,033
Свинец	0,031
Серебро	0,055
Сос а	0,65
Спирт	0,59
Сталь	0,115
Стекло	0,20
Цинк	0,093

¹ Некоторые называют *удельной теплоемкостью вещества*. Количество же тепла, потребное для нагрева *всего тела* на 1° , именуют *теплоемкостью тела*.

Как надо понимать, что теплоемкость олова равна 0,054?

Это значит, что для нагревания 1 кг олова на 1° надо израсходовать 0,054 большой калории.

Приведенные в таблице числа суть средние (в пределах от 0° до 100°): вообще говоря, теплоемкость данного вещества меняется с температурой, обычно увеличиваясь с ее повышением.

Если мы будем измерять вес вещества не в килограммах, а в тоннах, то соответственно теплоемкость выразится в *термиях*.

Измеряя же вес вещества в граммах, получим теплоемкость, выраженную в *малых калориях*.

В опыте, который мы проделали с нагреванием 2 кг воды в сосуде, мы вычислили расход тепла на этот процесс; однако мы не приняли во внимание нагревания самого сосуда. Определим теперь, сколько тепла пошло на его нагревание. Пусть он сделан из меди и весит 1400 г.

Чтобы 1 кг меди нагреть на 1° , надо затратить столько больших калорий тепла, какова ее теплоемкость, т. е. 0,095 больших калорий, для нагрева же 1400 г, т. е. 1,4 кг на 1° , надо тепла в 1,4 раза больше, т. е. $0,095 \times 1,4 = 0,133$ большой калории. Подогреть сосуд нам нужно не на 1° , а так же, как и воду, на 80° , т. е. от 20° до 100° , для чего и тепла потребуется в 80 раз больше $0,133 \times 80 = 10,64$ больших калорий.

Подсчитаем теперь, сколько потребовалось тепла для нагревания 2 кг ртути в том же сосуде?

Чтобы 1 кг ртути нагреть на 1° , нужно 0,033 больш. калор.
 > 2 > > > 1° , > 0,066 > >
 > 2 > > > 80° , > 5,28 > >

Кроме того, на нагревание сосуда и в этом случае расходуется 10,64 больших калорий.

Итого $5,28 + 10,64 = 15,92$, т. е. приблизительно в 12 раз меньше, чем для нагревания воды в сосуде. Время, затраченное при этом втором опыте, также приблизительно в 12 раз меньше, чем в первом.

§ 180. Определение теплоемкости вещества. Предположим, вам дали некоторое тело, теплоемкость вещества которого требуется определить. Возьмем какой-нибудь сосуд, например, латунный, взвесим его, — пусть он весит 100 г, — нальем туда воды, определим ее вес, скажем, 800 г. Опустим туда термометр и запишем его показание. Конечно, температура и воды и сосуда будет одинакова, например, 15° . Составим табличку, как это здесь показано, и запишем все данные.

	Вес в грам.	Темпе- ратура	Тепло- емкость	Общая темпер. = 33°
Сосуд	100	15°	0,093	
Вода	800	15°	1	
Испыт. тело . . .	2000	100°	x	

Теперь взвесим испытуемое тело, отметим в таблице его вес (положим, 2000 г) и подержим его некоторое время в парах кипящей воды, пока он не подогреется до их температуры, т. е. до 100° . Быстро опустим его в сосуд с водой и станем помешивать воду.

Испытуемое тело будет остывать, вода же и стенки сосуда, наоборот, нагреваться. Отметим общую температуру. Пусть она равна 33° .

Подсчитаем, сколько тепла получили вода и сосуд при своем нагревании на $33^{\circ} - 15^{\circ} = 18^{\circ}$ и, наоборот, сколько тепла отдало тело при охлаждении от 100° до 33° , т. е. на 67° . Так как веса всех тел у нас даны в граммах, то тепловые подсчеты мы поведем в малых калориях.

Чтобы 1 г воды нагреть на 1° , нужно 1 мал. калор.
 „ 800 „ „ „ „ 1° , „ 800 „ „
 „ 800 „ „ „ „ 18° , „ 14 400 „ „

Следовательно, для нагревания воды израсходовано 14 400 малых калорий.

Переходим теперь к сосуду.

Чтобы 1 г латуни нагреть на 1° , нужно 0,093 мал. калор.
 „ 100 „ „ „ „ 1° , „ 9,3 „ „
 „ 100 „ „ „ „ 18° , „ 167,4 „ „

Всего вода и сосуд получили $14\,400 + 167,4 \approx 14\,570$ мал. калорий. Определим теперь, сколько малых калорий отдало испытуемое тело. Обозначим его теплоемкость через x .

1 г испытуемого тела, остывая на 1° , отдает x мал. калор.
 2000 „ „ „ „ „ 1° , „ $2000x$ „ „
 2000 „ „ „ „ „ 67° , „ $134\,000x$ „ „

Тепло, отданное испытуемым телом, равно теплу, полученному водой и стенками сосуда:

$$14\,570 = 134\,000x.$$

Отсюда

$$x = \frac{14\,570}{134\,000} = 0,11 \text{ (приблизительно).}$$

В тех случаях, когда ищут, подобно нам, лишь приблизительный результат, можно пренебрегать тем теплом, которое идет на подогревание стенок сосуда. Оно обычно составляет небольшую часть тепла, полученного водою, — в нашем случае немного более 1%.

Эту же задачу решим на буквах. Данные записаны в таблицу.

	Вес в граммах	Темпе- ратура	Тепло- емкость	Общая темпер. = T°
Вода	p_1	t_1°	1	
Сосуд	p_2	t_1°	c	
Испыт. тело . . .	p_3	t_2°	x	

Тепло, полученное водою:

Чтобы 1 г воды нагреть на 1° , нужно 1 мал. калор.
 p_1 » » » » 1° , » p_1 » » »
 p_1 » » » » $(T - t_1)^\circ$, » $p_1 (T - t_1)$ » »

Тепло, полученное сосудом:

Чтобы 1 г вещества сосуда нагреть на 1° , нужно с мал. калор.
 p_2 » » » » 1° , » » » » cp_2 » » »
 p_2 » » » » $(T - t_1)^\circ$, » » » » $cp_2 (T - t_1)$ » »

Всего вода и сосуд получили:

$$p_1 (T - t_1) + cp_2 (T - t_1) = (p_1 + cp_2) (T - t_1).$$

Тепло, отданное испытуемым телом:

1 г испытуем. тела, охлад. на 1° , отдает x мал. калор.
 p_3 » » » » 1° , » $x p_3$ » » »
 p_3 » » » » $(t_2 - T)^\circ$, » $x p_3 (t_2 - T)$ » »

Тепло, полученное водою и сосудом, равно теплу, отданному испытуемым телом:

$$(p_1 + cp_2) (T - t_1) = p_3 x (t_2 - T);$$

откуда

$$x = \frac{(p_1 + cp_2) (T - t_1)}{p_3 (t_2 - T)}.$$

§ 181. Калориметр. Можем ли мы поручиться за достаточную точность нашего определения теплоемкости? Нет. Мы совершенно пренебрегли теми потерями тепла, которые имели место во время производства опыта. Так, наш сосуд отдавал тепло столу, на котором он стоял, и окружающему воздуху. Как уменьшить эти потери на столько, чтобы они не отражались чувствительно на опытах? Нужно наш сосуд *A* окружить вторым сосудом *B* так, как это показано на рисунке 193. Прослойка воздуха *C* между стенками будет предохранять содержимое внутреннего сосуда от быстрого охлаждения.

Изготовленный таким образом прибор, очень удобный для определения теплоемкости тел и других опытов по теплоте, носит название *калориметра*.

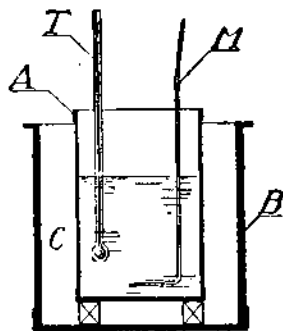


Рис. 193.

§ 182. Калориметрический метод измерения температур. Для измерения высоких температур нельзя пользоваться обыкновенным ртутным термометром, так как уже при 357° ртуть начинает кипеть. Измерить же высокие температуры в технике приходится очень часто. В таких случаях иногда прибегают к калориметрическому методу.

Пусть, например, требуется определить температуру пламени горелки. Вводят в горелку металлический шарик из тугоплавкого вещества и держат в пламени

достаточно долго, пока он не нагреется до его температуры (x). Затем быстро погружают этот шарик в калориметр с какой-либо жидкостью, температура которой была предварительно измерена (t°). Шарик, охлаждаясь, отдает тепло, которое идет на повышение температуры калориметра и жидкости в нем.

Замечают общую температуру (T°). Все данные о весе, температуре и теплоемкости записывают в табличку.

	Вес в грамм.	Темпе- ратура	Тепло- емкость	Общая температ. $= T^\circ$
Калориметр . . .	p_1	t°	c_1	
Жидкость в нем .	p_2	t°	c_2	
Шарик, нагретый до неизвестной температуры .	p_3	x	c_3	

Тепло, отданное шариком при его остывании от первоначальной температуры x° до общей T° , т. е. на $(x - T)^\circ$:

$$c_3 p_3 (x - T) \text{ мал. кал.}$$

Тепло, полученное калориметром и жидкостью в нем при их нагревании от первоначальной температуры t° до общей T° , т. е. на $(T - t)^\circ$:

$$c_1 p_1 (T - t) + c_2 p_2 (T - t) \text{ мал. кал.}$$

Тепло, отданное шариком, равно теплу, полученному калориметром и жидкостью в нем: ¹

$$c_3 p_3 (x - T) = c_1 p_1 (T - t) + c_2 p_2 (T - t).$$

Решая уравнение, имеем:

$$x = \frac{(c_1 p_1 + c_2 p_2) (T - t)}{c_3 p_3} + T.$$

§ 183. Теплотворная способность топлива. В качестве источников тепла мы пользуемся различными горючими. При горении происходит соединение вещества горючего с кислородом воздуха; реакция эта сопровождается выделением тепла.

Количество больших калорий тепла, выделяющихся при полном сгорании 1 кг топлива, носит название теплотворной способности или теплоты сгорания.

Вот таблица теплотворных способностей различных тел:

Наименование топлива	Теплотворная способность	Наименование топлива	Теплотворная способность
Березовые дрова (вылежав- шиеся)	3150	Английский уголь (кардиф) .	7650
Сосновые дрова (вылежав- шиеся)	3200	Древесный уголь	8000
Торф (в среднем)	3400	Подмосковный курный уголь	8400
Бурый уголь (20% влаги) .	4700	Нефть	10.00
Донецкий каменный уголь .	7000	Бензин	11200
„ „ австралийск.	7200	Керосин	11000
Английский (Йоркширский) уголь	6600	Мазут	11200
		Спирт (ректифак.)	7100
		Спирт денатураров.	6400

¹ Уравнение, выражающее равенство количества тепла, отданного и полученного, называется *калориметрическим уравнением*, или *тепловым балансом*.

Теплотворная способность березовых дров несколько ниже таковой у сосновых. Березовые дрова однако выгоднее, так как их удельный вес почти в полтора раза превосходит вес сосновых дров, почему при одинаковом объеме они и дают больше тепла.

§ 184. Калориметрическая бомба. Для определения теплотворной способности топлива пользуются особым калориметром, называемым *калориметрической бомбой*. Герметически закупориваемый сосуд *C* (рис. 194) наполняется кислородом под давлением в 20—25 атм.; внутри его помещается тигелек *т* с испытуемым топливом. Пропуская электрический ток по проводнику *E*, погруженному в тигелек *K*, вызывают сгорание топлива.

Сосуд *C* находится внутри калориметра *B* с водою, кожух которого *A* препятствует потере тепла в окружающее пространство.

При помощи термометра *T* определяют повышение температуры и вычисляют количество выделившегося тепла при сгорании испытуемого топлива. Зная вес сгоревшего топлива, легко определить его теплотворную способность.

§ 185. Вычисление расходов тепла. Зададимся целью подсчитать количество древесного угля, необходимого для того, чтобы нагреть в самоваре воду до температуры кипения. Пусть медный самовар весит 4 кг, и в нем помещается 5 кг воды.

Сначала определим количество тепла, нужное для подогревания воды от 10° (положим она до нагревания имела эту температуру) до 100°, а затем тепло, необходимое для нагревания самого самовара.

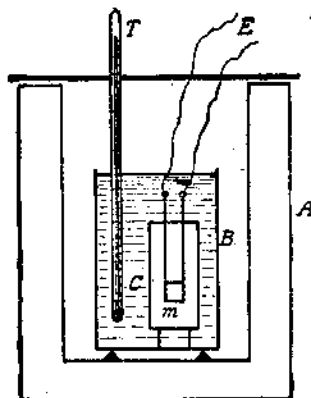


Рис. 194.

Для нагревания	1 кг воды на	1° нужно затратить	1	больш. кал.
»	»	1°	5	»
»	»	90°	450	»
»	1 кг меди	1°	0,095	»
»	»	1°	0,38	»
»	»	90°	34,2	»
		(около)	35	»

Всего необходимо $450 + 35 = 485$ больш. кал

1 кг древесного угля, сгорая, выделяет 8000 больш. кал.

Сколько нужно угля для получения 485 больш. кал.? Не трудно сообразить, что расход угля должен составить

$$\frac{485}{8000} = \text{около } 0,06 \text{ кг. или } 60 \text{ г.}$$

Прделаем теперь опыт. Поставим самовар и определим, какое количество древесного угля расходуется в действительности? Оказы-

¹ Для простоты будем считать, что все части самовара из меди и нагреваются до 100°.

вается, что около 180 г, т. е. значительно больше, чем мы подсчитали теоретически. Это объясняется тем, что не все тепло, выделенное при сгорании угля, пошло на нагревание самовара и воды в нем; большая же часть была потеряна вследствие того, что горючие продукты сгорания унесли с собою значительное количество тепла; кроме того, стенки самовара непрерывно теряли тепло, отдавая его окружающему воздуху.

180 г сгоревшего угля выделили:

$$8000 \times 0,180 = 1440 \text{ больш. кал.,}$$

полезно же на нагревание воды и самовара пошло только 485 больш. кал., т. е.

$$\frac{485}{1440} = 0,337$$

или около 34%. Полученное нами отношение количества тепла, израсходованного полезно (в данном случае на нагревание воды и самовара), к общему количеству выделившегося тепла будем называть коэффициентом полезного действия.

Итак, коэффициент полезного действия самовара около 34%.

Решим задачу. Требуется определить, какое количество денатурированного спирта нужно израсходовать, чтобы нагреть на спиртовой лампочке 300 г воды, находящейся в стеклянном сосуде весом 100 г, от первоначальной температуры 15° до 85°. Коэффициент полезного действия 40%.

Для нагревания воды от 15° до 85°, т. е. на 70°, нужно затратить:

$$1 \cdot 300 \cdot 70 = 21\,000 \text{ мал. кал.}$$

Для нагревания сосуда также на 70° (теплоемкость стекла $c = 0,20$) потребно:

$$0,20 \cdot 100 \cdot 70 = 1\,400 \text{ мал. кал.}$$

Всего следовательно необходимо для нагревания воды и сосуда:

$$21\,000 + 1\,400 = 22\,400 \text{ мал. кал.}$$

Теплотворная способность денатур. спирта 6400 б. к. Это надо понимать так, что каждый килограмм его выделяет при своем сгорании 6400 б. к. Очевидно каждый грамм его выделяет 6400 мал. кал. Из этого тепла всего лишь 40%, т. е.

$$\frac{6400 \cdot 40}{100} = 2560 \text{ мал. кал.}$$

идет на полезное нагревание.

Необходимая затрата спирта выразится в

$$\frac{22\,400}{2560} = 8,75 \approx 9 \text{ г.}$$

§ 186. Калорийность пищи. Пища человека и животных также является топливом, которое соединяется с кислородом вдыхаемого воздуха и как бы медленно сгорает, являясь источником энергии. Различные виды пищи обычно характеризуются *калорийностью*.

Калорийностью пищи называется число больших калорий, выделяемых при сгорании 1 кг пищи.

Для определения калорийности можно воспользоваться калориметрической бомбой.

Приводим таблицу калорийности различных видов растительной и животной пищи:

масло	7800	пшеничный хлеб	2700
сало	7200	ржаной хлеб	2110
орехи волошские	6650	мясо бычье	1380
какао	5740	сеledка	1330
свинина жирная	4540	осетрина	1210
сахар	4100	картофель	980
сыр	3880	молоко	720
мука пшеничная	3620	яблоки	570
сухие корни	3430	капуста	330
горох	3300		

Для выяснения вопроса о пищевой норме животных, очевидно, необходимо знание ее калорийности.

§ 187. Связь между теплотой и работой. Мы уже указывали, что при совершении механической работы всегда выделяется тепло. Вспомните нагревание пилы при пилке дров, добывание огня дикарями; приведите сами примеры выделения тепла при трении и ударе.

Обратно: теплота может служить источником работы. Тепловые двигатели различного типа имеют назначение преобразовать тепловую энергию, выделяющуюся при сгорании топлива, в механическую работу.

Первый, попытавшийся установить количественную связь между произведенной работой и выделенной в результате ее теплотой, был Бенжамин Томсон. В 1798 году он поместил в одном научном журнале интересную статью о появлении тепла при трении. Свои исследования он сделал в Мюнхене, наблюдая над сверлением пушек в арсенале. В деревянный ящик, наполненный водою, был вставлен бронзовый пушечный ствол таким образом, что его можно было вращать посредине ящика, при этом неподвижно укрепленный стальной бурав высверливал дуло. В результате трения пушечный ствол, бурав и вода в ящике нагревались, а последняя через несколько часов работы даже начинала кипеть.

Томсон, с одной стороны, подсчитал то количество тепла, которое выделилось при трении, а с другой стороны определял величину произведенной работы и установил таким образом численную связь между теплотой и работой.

Однако измерения Томсона были недостаточно точны, и полученный им результат значительно отличался от истинного.

§ 188. Опыт Джоуля. В 1851 году знаменитый английский физик Джоуль первый произвел точное определение численной связи между теплотой и работой.

На рис. 195 изображен прибор, которым пользовался ученый. В калориметр *B* с выступами в стенках вставлен вал с лопастями, приходящимися в промежутках между выступами в стенках; в калориметр наливается вода, температура ее и стенок сосуда определяется с помощью термометра до начала опыта. На ось вала *A* в его верхней части насажен ворот, на который наматываются шнуры, развертывающиеся по двум противоположным направлениям и перекинутые через блоки. К концам шнурков подвешены грузы *E*; падая вниз, они

заставляют шнуры сматываться с ворота и приводят его вместе с валом и лопастями во вращательное движение. При этом происходит трение поверхностей лопастей о воду в калориметре, а этой последней о боковые выступы у стенок — в результате трения выделяется тепло и температура воды в сосуде поднимается.

Не трудно подсчитать величину работы, совершенной грузами при своем падении, а с другой стороны подсчитать, сколько калорий выделилось в результате этой работы.

Пусть q_1 — вес калориметра и всех металлических частей, c_1 — их средняя теплоемкость, q_2 — вес жидкости в калориметре, c_2 — ее теплоемкость. Обозначим первоначальную температуру через t° , а конечную через T° . В таком случае количество выделившегося в калориметре тепла (Q) будет равно:

$$Q = (c_1 q_1 + c_2 q_2)(T - t) \text{ бол. калор.},$$

если веса q_1 и q_2 выражены в килограммах.

Это количество тепла было получено в результате работы:

$$K = P H n \text{ кгм},$$

где P — вес падавших гирь, H — высота их падения, n — число падений. (Джоуль заставлял их падать много раз, так как при одном падении выделялось слишком мало тепла.)

Количество работы (A), равноценное одной большой калории, легко найти по формуле:

$$A = \frac{K}{Q} = \frac{P H n}{(c_1 q_1 + c_2 q_2)(T - t)}$$

Вводя в расчет различные поправки, например, принимая во внимание потерю тепла на трение в осях блоков и проч., Джоуль установил, что 1 большая калория соответствует 424 — 425 кгм работы.

Работы Джоуля отличались исключительной для его времени точностью; он производил свои исследования десятки раз, пользуясь калориметрами из разных материалов, а также различными жидкостями в них, и во всех опытах получил результаты с ошибкой не более 1 — 2 кгм.

То количество работы, которое равноценно 1 бол. калор., носит название механического эквивалента тепла.

Таким образом, по определению Джоуля, механический эквивалент тепла оказался равным 424 — 425 кгм.

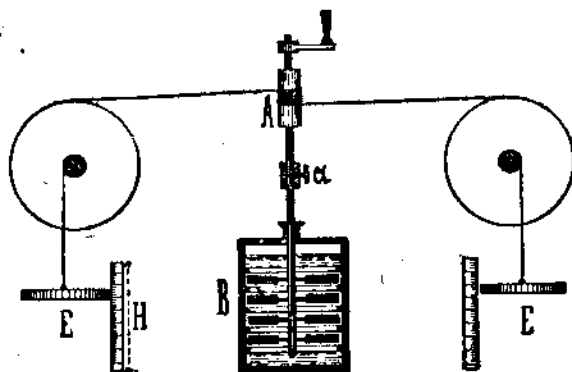


Рис. 195.

§ 189. Опыт Гирна. Вскоре после определения механического эквивалента тепла Джоулем, другой физик, Густав Гирн, произвел свои опыты, подтверждавшие правильность вычислений Джоуля. Один из этих опытов мы и приводим ниже.

Цилиндрический железный стержень *A* (рис. 196) подвешен на шнурках таким образом, что он может качаться лишь в направлении своей оси. Таким же образом против стержня подвешен каменный брус *M*. Между железным стержнем и бруском помещается кусок свинца *D* с углублением. Приподняв железный стержень на некоторую высоту, Гирн опускал его и заставлял ударять о свинец, при этом свинец передавал толчок каменному брусу, который и отбрасывался на некоторую высоту, точно также и сам железный стержень после удара отскакивал в обратном направлении. Гирн подсчитывал, сколько килограмметров совершал стержень при своем падении, эта работа

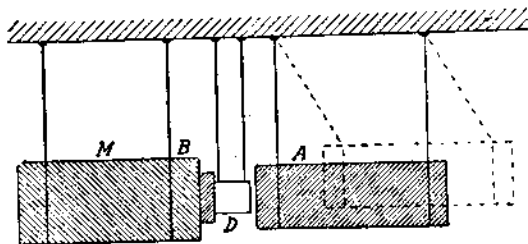


Рис. 196

расходовалась, во-первых, на отбрасывание каменного бруса, во-вторых, на отскакивание после удара самого железного стержня в обратном направлении и, наконец, на нагревание свинца. Гирн вычислял работу, совершенную каменным бруском и железным стержнем при отскакивании, сравнивал их сумму со всей работой, произведенной стержнем при падении, и определял то количество работы, которое пошло на нагревание свинца при ударе. В углубление в куске свинца наливалась вода и определялось повышение ее температуры, что давало возможность установить количество выделившегося тепла. По вычислениям Гирна 1 большая калория тепла получалась в результате работы в 424,9. Результат очень близкий к найденному Джоулем.

§ 190. Величина механического эквивалента тепла. Из новейших определений следует, что:

1 большая калория равноценна работе в 427 кгм.

В дальнейшем мы будем пользоваться именно этой зависимостью между теплотой и работой:

$$A = 427 \text{ кгм.}$$

Величина, обратная механическому эквиваленту тепла, носит название *теплового эквивалента работы*.

Тепловой эквивалент работы (*E*) есть количество тепла, равноценное 1 кгм.

Очевидно
$$E = \frac{1}{A} = \frac{1}{427} = 0,0024 \text{ бол. кал.,}$$

то есть

$$1 \text{ кгм работы равноценен } 0,0024 \text{ бол. кал.}$$

§ 191. Расчет топлива. В тепловых двигателях тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, превращается в механическую работу. Однако в полезную работу переходит только часть тепловой энергии, остальное теряется для нас бесполезно на нагревание окружающего воздуха.

Отношение тепла, пошедшего на полезную работу, к общему количеству тепла, выделенного из топлива, носит название *коэффициента полезного действия теплового двигателя*.

В дальнейшем мы разберем потери энергии в тепловых двигателях, пока же отметим, что коэффициент полезного действия паровой машины не превышает 20%, а двигателя внутреннего сгорания 40%.

Решим задачу. Требуется определить расход каменного угля с теплотворной способностью 7 200 бол. кал. для часовой работы паровой машины, развивающей мощность в 100 лощ. сил при коэффициенте полезного действия 10%.

Если мощность машины 1 л. с. это значит, что машина каждую секунду совершает работу 75 килограммометров.

100 лошадиных сил дают работу.

$$75 \times 100 = 7\,500 \text{ кгм в секунду,}$$

или

$$7\,500 \times 60 \times 60 = 27\,000\,000 \text{ кгм в час.}$$

За счет одной большой калории тепла может быть получена работа в 427 кгм. Для получения 27 000 000 кгм очевидно необходимо

$$\frac{27\,000\,000}{427} \cong 63\,200 \text{ бол. кал.}$$

Теплотворная способность топлива 7 200 бол. кал. Следовательно каждый килограмм каменного угля, на котором работает машина, выделяет при своем полном сгорании 7 200 бол. кал.

Однако только 10% этого тепла, т. е.

$$\frac{7\,200 \times 10}{100} = 720 \text{ бол. кал.}$$

идет на полезную работу, а все остальное тепло, выделенное каждым килограммом топлива, теряется бесполезно.

Если для часовой работы машины нужно 63 200 больших калорий, а каждый килограмм угля дает полезно 720 бол. кал., то очевидно количество потребного угля определяется в

$$\frac{63\,200}{720} \cong 88 \text{ кг.}$$

Решим ту же задачу на буквах. Пусть мощность машины W л. с., а коэффициент полезного действия $K\%$. Требуется определить расход топлива с теплотворной способностью Q калорий в течение T часов.

Работа W л. с. в T часов составляет:

$$W \cdot 75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot T = 75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot WT \text{ кгм.}$$

Для чего потребно бол. кал.

$$\frac{75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot W \cdot T}{427}.$$

Каждый килограмм топлива выделяет полезно

$$\frac{QK}{100} \text{ бол. кал.}$$

Таким образом, расход топлива составит:

$$P = \frac{75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot W \cdot T \cdot 100}{427 \cdot Q \cdot K} \text{ кг.}$$

В этой формуле встречается выражение

$$\frac{75 \cdot 60 \cdot 60}{427} \cong 632 \text{ бол. кал.,}$$

представляющее собою количество бол. кал., эквивалентное работе одной лошадиной силы в течение 1 часа. Это число рекомендуется запомнить. Знание его облегчит решение подобных задач на расчет топлива.

Таким образом мы имеем:

$$P = 632 \cdot \frac{W \cdot T \cdot 100}{Q \cdot K} \text{ кг.}$$

Этой формулой можно воспользоваться для решения различных задач. Если неизвестным является коэффициент полезного действия машины ($K\%$), а все остальные величины, входящие в формулу, известны, то

$$K = 632 \cdot \frac{W \cdot T}{Q \cdot P} 100.$$

Если требуется определить число часов T , на которое хватит запаса топлива P кг для машины мощностью W л. с., при теплотворной способности топлива Q и коэффициенте полезного действия $K\%$, решим эту формулу относительно T :

$$T = \frac{P \cdot Q \cdot K}{632 \cdot W \cdot 100}.$$

Аналогично можно определить Q и W :

$$Q = 632 \cdot \frac{W \cdot T \cdot 100}{K \cdot P}$$

$$W = \frac{P \cdot Q \cdot K}{632 T \cdot 100}.$$

§ 192. Вопросы и задачи. 281. Сколько малых калорий в термине?

282. Для нагревания 3 л воды, взятой при 10° , было затрачено 120 бол. кал.

Какова температура воды после нагревания?

283. Какое количество воды нагрели от 20° до 80° , если было затрачено 900 бол. кал?

284. Сколько нужно затратить тепла, чтобы нагреть 40 кг свинца от 30° до 330° ?

285. Найти общую температуру, установившуюся при смешении 400 г воды при 50° и 100 г воды при 10° .

286. Какое количество воды при 15° нужно добавить к 5 кг воды, взятой при 50° , чтобы общая температура сделалась равной 40° ?

287. При какой температуре была взята вода в количестве 20 л, если после смешения ее с 8 л воды при $12,5^\circ$ общая температура сделалась равной 25° ?

288. Найти общую температуру, установившуюся после опускания медной гири весом в 1 кг, нагретой до 100° , в 500 г воды, находящейся в медном сосуде весом 200 г. Температура воды в сосуде 20° .

289. Какое количество воды находилось в железном сосуде весом 200 г, если после опускания в нее свинцового шара весом 500 г, нагретого до 100° , температура поднялась с 15° до 18° .

290. При какой температуре была вода, взятая в количестве 600 г, если после опускания в нее железного тела весом 150 г, нагретого до 53° , устанавливалась общая температура в 30° .

291. Определить теплоемкость вещества некоторого тела, если оно имеет вес 500 г и, будучи нагрето до 100° , подняло температуру 200 г воды с 12° до 22° . Вода была в железном сосуде весом 100 г.

292. Сколько граммов керосину нужно израсходовать в примусе, коэфф. полезного действия коего 40% , чтобы нагреть 2 л воды, находящейся в железном сосуде весом 1 кг от 10° до 60° ? Теплотв. способность керосина 10 300 бол. кал.

293. Определить коэфф. полезного действия спиртовки, если известно, что для нагревания на ней 581 г воды в медном сосуде весом 200 г на 60° было израсходовано 20 г спирта, теплотворная способность которого 6 400 мал. кал.

294. В керосиновой кухне сгорает каждую минуту 3 г керосина (теплотв. способность 10 500 мал. кал.). Сколько времени нужно нагревать на ней 10 л воды на 40° ? На нагревание сосуда расходуется 2% тепла, идущего на нагрев воды. Коэфф. полезного действия кухни 30% .

295. С высоты 25 м упал кусок железа объемом $0,5 \text{ м}^3$. На сколько градусов поднялась его температура при ударе о землю?

296. Считая, что коэффициент полезного действия спиртовой лампочки 36% , а теплотворная способность денатурированного спирта 6 400 бол. кал., определить расход его для нагревания 500 г воды, находящейся в стеклянном сосуде весом 100 г, от 20° до 80° .

297. Определить коэффициент полезного действия керосиновой кухни, если для нагревания 5 кг воды в железном сосуде весом 1 кг на 80° потребовалось 100 г керосина с теплотворной способностью 10 800 мал. кал.

298. Найти коэффициент полезного действия Дизель-мотора, мощностью 100 л. с., потребляющего в час 20 кг нефти с теплотворной способностью 10 500 бол. кал.

299. Какое количество торфа (теплотв. способность 3 600 б. к.) нужно заготовить для месячной работы паровой турбины мощностью 1 000 л. с., если ее коэффициент полезного действия 20% и она работает в среднем по 15 часов в сутки?

300. Паровая машина имеет мощность 50 л. с. и коэфф. полезного действия 10% . Сколько часов работала в среднем машина в сутки, если она израсходовала за месяц 15 т каменного угля с теплотворной способностью 7 200 бол. кал.

301. На сколько времени непрерывной работы хватит запаса топлива в 50 т для паровой машины мощностью 250 л. с., обладающей коэффициентом полезного действия 16% , если теплотворная способность топлива 7 500 бол. кал.?

302. Какой запас топлива нужно сделать на год для 2 паровых машин мощностью по 500 л. с., если они ежедневно в среднем работают по 10 часов и обладают коэффициентом полезного действия 20% ? Теплотворная способность топлива 6 700 бол. кал.

303. Найти мощность машин парохода, обладающих коэффициентом полезного действия 10% , если они потребляют в течение 5-дневного непрерывного плавания 1 000 т каменного угля с теплотворной способностью 7 000 бол. кал.

304. Паровоз, обладая коэффициентом полезного действия 5% и мощностью 600 л. с., израсходовал на час 1 т каменного угля. Найти теплотворную способность топлива.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ.

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА.

§ 193. Теплопроводность. Описывая устройство калориметра, мы уже отмечали, что воздух является дурным проводником тепла. Наоборот, металлы хорошо проводят тепло. Поставьте сосуд с теплой во-

дою на толстую медную пластинку и вы заметите, как быстро он начнет охлаждаться. Медь хороший проводник тепла, она быстро передает отнятое от сосуда тепло от места соприкосновения к более отдаленным частям пластинки. Опустите в горячий чай серебряную ложку — от нагретой части тепло быстро перейдет к холодной, через минуту вам трудно будет ее удерживать в руках, между тем как стеклянная ложка, нагретая в нижней части, остается попрежнему холодной в верхней.

Способность тел непосредственно передавать тепло от нагретой части к холодной носит название теплопроводности.

Не трудно объяснить, что происходит при передаче тепла. Частицы нагретой части тела двигаются сравнительно быстро, они сообщают толчки более медленно движущимся частицам холодной части тела, заставляют их увеличивать свою скорость, что и вызывает повышение температуры.

Лучшим проводником тепла является серебро, затем медь, цинк; железо проводит тепло в 8 раз хуже серебра, свинец в 12 раз, ртуть в 50 раз и т. д. К плохим проводникам тепла относятся: стекло, мех, бумага, шерсть, вода и большинство жидкостей, за исключением расплавленных металлов, газы. Так, вода проводит тепло хуже серебра в 20 000 раз, воздух в 500 000 раз.

Рисунок 197 изображает прибор, с помощью которого легко судить о той или иной теплопроводности различных тел.

Он состоит из металлического ящика, в который вставлено несколько стержней из различных веществ. Концы их находятся внутри ящика, куда наливается горячая вода, температура которой с помощью лампочки поддерживается постоянной. Поверхности стержней покрыты воском. Следя за быстротой таяния воска, можно судить о теплопроводности тех веществ, из которых сделаны эти стерженьки.

На применении плохих проводников основано предохранение тел от остывания; так трубы, по которым передается пар из парового котла к машине, всегда обертывают дурными проводниками тепла.

Прослойка воздуха между наружной и внутренней рамой изолирует комнатный воздух от отдачи тепла на улицу.

Какую обувь лучше носить зимою — узкую или широкую, кожаную или валяную? Для чего обертывают ноги в сильные морозы газетной бумагой.

§ 194. Лампа Дави. Если над газовой горелкой поместить медную сетку, как показано на рис. 198, открыв кран для газа, зажечь его над сеткой, то пламя не проникнет внутрь под сетку. Сетка отнимает тепло от пламени; благодаря хорошей теплопроводности меди это тепло распространяется по всей сетке и излучается с

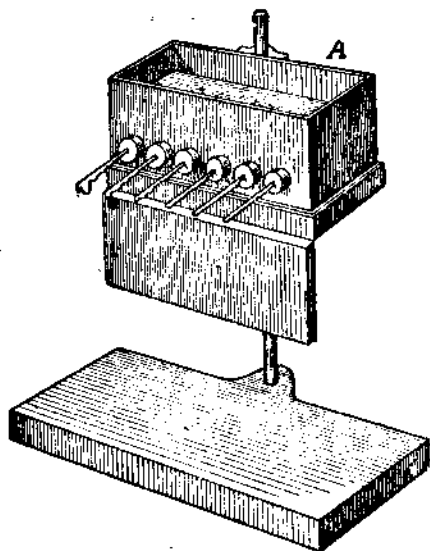


Рис. 197.

ее поверхности в окружающее пространство; по другую же сторону сетки не может проникнуть достаточного количества тепла, чтобы вызвать горение газа.

Это свойство сетки не пропускать пламя применяется в лампах Дэви (рис. 199), которыми пользуются в угольных копях. В копях постоянно выделяется горючий газ — метан, который в смеси с воздухом легко производит взрывы.

Лампа английского ученого Дэви давала возможность работать в угольных коях, не боясь взрыва метана. Ее пламя было окружено медной сеткой. Взрыв метана внутри сетки не распространяется наружу, и лампа была вследствие этого совершенно безопасной.

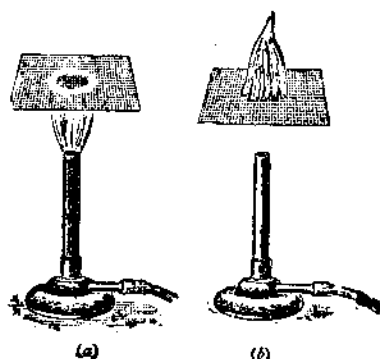


Рис. 198.

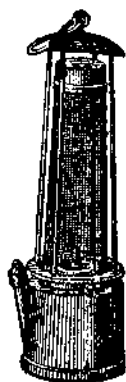


Рис. 199.

§ 195. Коэффициент внутренней теплопроводности. Чтобы численно охарактеризовать теплопроводность различных тел, можно проделать следующий опыт (рис. 200). Изготовив ряд стержней из испытуемых материалов, погружим один из них концом A в сосуд с кипящей водой (M), а концом B в калориметр K , в котором находится вода при более низкой температуре.

Тепло будет передаваться по стержню в направлении от A к B . Измерив температуру воды в калориметре K до начала опыта (t°) и через некоторый промежуток времени (T°), можно вычислить количество тепла (Q), переданного по стержню AB .

Пусть вес калориметра K равен p_1 г, его теплоемкость — c , вес находящейся в калориметре воды — p_2 г. В таком случае количество переданного тепла Q выразится формулой:

$$Q = (cp_1 + p_2) (T - t) \text{ мал. кал.}$$

Проведя ряд опытов со стержнями различной длины и площади поперечного сечения, но изготовленными из одного и того же материала, можно прийти к заключению, что количество переданного по стержню тепла прямо пропорционально его площади сечения (s) и обратно пропорционально длине (l).

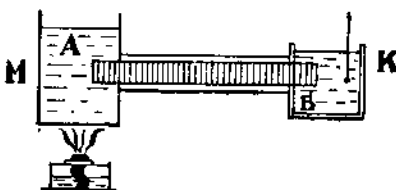


Рис. 200.

Меняя же начальную температуру воды в калориметре K , легко убедиться в том, что количество переданного тепла Q пропорционально разности температур ($T - t^\circ$) на концах стержня.

Также не трудно сделать вывод, что количество переданного по стержню тепла пропорционально времени (n).

Таким образом, количество тепла Q можно выразить формулой:

$$Q = K \cdot \frac{s}{l} (T - t) n,$$

где K — некоторый коэффициент пропорциональности, носящий название *коэффициента внутренней теплопроводности*.

Проведя опыты со стержнями из различных материалов, можно найти соответствующие численные значения для K .

При длине стержня $l = 1$ см, площади поперечного сечения $s = 1$ см², разности температур ($T - t$) = 1° и времени $n = 1$ сек.

$$Q = K \cdot \frac{1}{1} \cdot 1 \cdot 1 \text{ мал. кал.};$$

$$Q = K \text{ мал. кал.},$$

т. е. коэффициент внутренней теплопроводности выражает количество тепла (малых калорий), которое протекает по стержню длиной 1 см и площадью поперечного сечения 1 см² в течение 1 сек при разности температур на его концах в 1°.

Приводим данные о коэффициентах внутренней теплопроводности для различных материалов.

Вещество	Коэффициент внутренней теплопроводности
Серебро	1,006
Медь	0,892
Железо	0,144
Свинец	0,083
Мрамор	0,008
Кирпич	0,002
Мелкий песок	0,00013
Дерево вдоль волокон	0,00007
» поперек »	0,00004

Решим задачу. Требуется определить, какое количество тепла передается из комнаты наружному воздуху через стену дома площадью 20 м² в течение одного часа, если толщина стены 0,5 м, коэффициент внутренней теплопроводности $k = 0,002$. Температура воздуха в комнате $T = 15^\circ$, наружная температура $t = -15^\circ$.

Подставляем в формулу

$$Q = K \cdot \frac{s}{l} \cdot (T - t)n$$

вместо $s = 20 \text{ м}^2 = 200\,000 \text{ см}^2$,

» $l = 0,5 \text{ м} = 50 \text{ см}$,

» $T - t = 15^\circ - (-15^\circ) = 30^\circ$,

» $n = 1 \text{ час} = 3\,600 \text{ сек}$.

$$Q = 0,002 \cdot \frac{200\,000 \cdot 30 \cdot 3\,600}{50} = 864\,000 \text{ мал. кал.}$$

$Q = 864 \text{ бол. кал.}$

В технике коэффициенты внутренней теплопроводности обычно измеряют числом больших калорий, передаваемых в течение 1 часа через площадь 1 м² при длине тела в 1 м и разности температур в T . Вычисленные таким образом коэффициенты внутренней теплопроводности в 360 раз больше коэффициентов внутренней теплопроводности, представленных в таблице.

§ 196. Прибор Христиансена. Прибор Христиансена является одним из простейших приборов для определения коэффициентов внутренней теплопроводности. Он состоит из нижнего медного сосуда B (см. рис. 201), через который протекает проточная холодная вода, и такого же верхнего сосуда A , где происходит кипение воды. Между обоими сосудами проложены три толстых медных пластинки C_1 , C_2 и C_3 со вставленными в них термометрами. Между верхней и средней пластинкой помещается слой испытуемого вещества (D), а между средней и нижней пластинкой слой вещества (E) с известной теплопроводностью. Оба слоя берутся с площадью поперечного сечения, равной площади сечения пластинок C_1 , C_2 и C_3 .

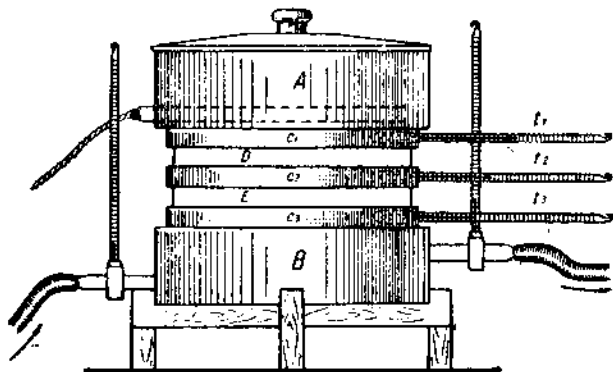


Рис. 201

Показания термометров t_1 , t_2 и t_3 , вставленных сбоку в медные пластинки C_1 , C_2 и C_3 , в начале опыта изменяются, но через некоторый промежуток времени устанавливаются неизменными. В таком случае, можно заключить, что через сечение пластинки D и сечение пластинки E проходят в одинаковое время равные количества тепла.

Количество тепла Q_1 , проходящее за время n через испытуемый слой D ,

$$Q_1 = \frac{x(t_1 - t_2)sn}{l_1},$$

где x — коэффициент внутренней теплопроводности, s — площадь сечения слоя, а l_1 — его толщина.

Количество тепла Q_2 , проходящее за то же время через слой E ,

$$Q_2 = \frac{k(t_2 - t_3)sn}{l_2},$$

где k — его коэффициент внутренней теплопроводности, s — площадь сечения (равная площади сечения испытуемого слоя) и l_2 — его толщина, так как

$$Q_1 = Q_2,$$

то

$$\frac{x(t_1 - t_2)sn}{l_1} = \frac{k(t_2 - t_3)sn}{l_2},$$

или

$$\frac{x(t_1 - t_2)}{l_1} = \frac{k(t_2 - t_3)}{l_2},$$

откуда

$$x = \frac{k(t_2 - t_3)l_1}{l_2(t_1 - t_2)} \quad (*)$$

Записав показания термометров t_1 , t_2 и t_3 , измерив толщины испытуемого слоя (l_1) и известного слоя (l_2) и зная коэффициент внутренней теплопроводности (k) слоя E , находим по формуле (*) коэффициент внутренней теплопроводности испытуемого материала.

§ 197. Конвекция. Вероятно вам приходится ставить самовар. Может быть, вы обращали внимание на одно очень интересное явление — если горение происходит лишь в верхней части трубы самовара, то вода наверху быстро начинает кипеть, тогда как ее нижние слои остаются холодными.

Объясняется это весьма просто: при нагревании воды сверху тепло передается исключительно теплопроводностью, а так как вода дурной проводник тепла, то нижние слои остаются холодными.

Отчего же, если огонь расположен в нижней части трубы и вода нагревается снизу, поднятие температуры происходит быстро и равномерно во всей ее массе?

Нагретшиеся части воды обладают меньшей плотностью, вследствие чего они, как более легкие, поднимаются кверху, а на их место опускаются вниз более тяжелые холодные части; нагреваясь, они снова поднимаются кверху и т. д. *Перенос тепла вследствие течения, образующегося в нагревающейся жидкости, носит название конвекции.*

В газах тепло передается также конвекцией. Легко заметить движение воздуха над всяким пламенем. Подержите руку над керосино-

вой кухней, свечей, спиртовой лампочкой или газовой горелкой — вы почувствуете быстрое движение теплого воздуха.

Откройте дверь из вашей квартиры на лестницу — теплый воздух будет выходить поверху, холодный же будет поступать в комнату внизу (рис. 202).

§ 198. Горение. При отсутствии конвекции не могло бы происходить *горения*. Горящее тело очень скоро было бы окружено оболочкой углекислого газа, и огонь прекратился бы. Однако нагретый воздух и продукты горения, расширившиеся от нагревания и сделавшиеся более легкими, энергично поднимаются вверх, на смену их подходят все новые и новые количества воздуха, кислород которого и поддерживает горение.

Керосиновая лампа дает тусклое, коптящее пламя, если оно не окружено стеклянной трубкой. Чем это объясняется? Очевидно, стеклянная трубка усиливает тягу воздуха. Нагретый внутри трубки воздух не смешивается с окружающим воздухом и не отдает ему тепла; этот столб теплого воздуха весит меньше, чем вытесненный им холодный воздух, вследствие этого он стремится подняться вверх с силой, равной разности этих весов. Чем разность весов больше, тем сильнее тяга. Чрез отверстия в горелке подходит холодный воздух, имеющий достаточное количество кислорода, необходимого для горения. Чем сильнее тяга, тем больше поступает кислорода и тем лучше происходит горение.

В тех случаях, когда хотят получить очень энергичное горение топлива,

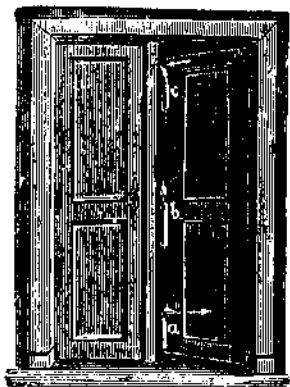


Рис. 202.

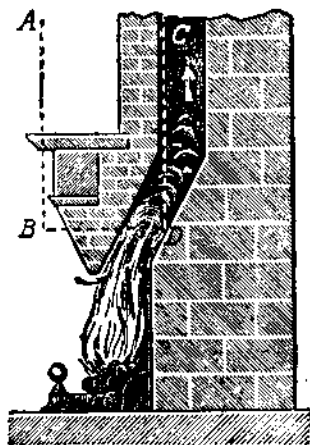


Рис. 203.

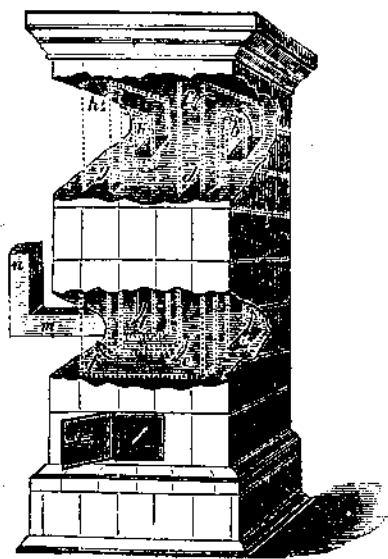


Рис. 204.

устанавливают высокие трубы. При большой длине трубы соответствующая разность весов столба теплого и холодного воздуха весьма велика — это создает сильную тягу. Вот почему фабричные трубы делаются очень высокие.

§ 199. Устройство печей. Вгляните на рис. 203 и 204, где показаны разрез камня и обыкновенной голландской печи.

Дымоход у каминя прямой и широкий; горячий воздух и газообразные продукты горения выходят из каминя, не успев отдать значительной части своего тепла его стенкам. Голландская же печь имеет дымоход, состоящий из ряда каналов: прежде чем поступить в вытяжную трубу, горячие продукты сгорания пройдут длинный путь по этим каналам, отдадут стенкам печи большую часть своего тепла. Таким образом, голландские печи значительно экономичнее каминов, зато, конечно, тяга воздуха при сжигании топлива в каминатах всегда бывает сильнее, чем в голландских печах.

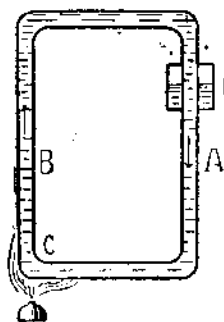


Рис. 205.

§ 200. Центральное отопление. В зависимости от того, какое нагретое тело является передатчиком тепла, различают *паровое* и *водяное* отопление. Для жилых домов чаще применяется последнее, к описанию которого мы и переходим.

На рис. 205 дана схема водяного отопления.

В точке C непрерывно происходит нагревание воды, тогда как в D она охлаждается.

В результате, веса столбов жидкости в трубах A и B будут неодинаковы, и получится непрерывный круговорот воды. Он будет происходить в течение всего времени, пока вода нагревается в C и охлаждается в D.

На этой схеме и основано устройство центрального водяного отопления, в котором источником тепла являются продукты горения от сжигаемого в топке топлива, а охладителем — воздух нагреваемых помещений.

Рис. 206 дает понятие о расположении отдельных частей отопления.

Здесь K — водяной котел, горячая вода из которого подымается по стояку (вертикальной трубе) S в верхний (чердачный) этаж, течет по горизонтальной трубе V и затем опускается по разводящим трубам, соединяющим с приборами, обогревающими помещения (радиаторами) H.

По охлаждении в последних, вода собирается рукавом R и вновь отводится в котел для нагревания.

A — расширительный сосуд, принимающий в себя избыток воды, получаемый от ее расширения при нагревании.

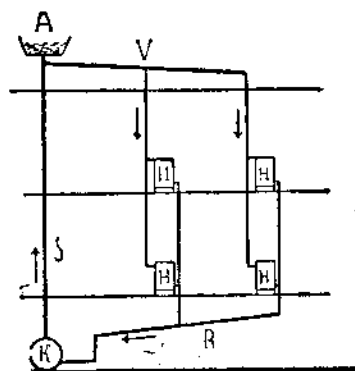


Рис. 206.

§ 201. Лучеиспускание. Поднесите руку к горячей печке. Вы почувствуете тепло с той стороны руки, которая обращена к ней. Между тем температура воздуха почти одинакова как с одной, так и с другой стороны руки. Следовательно *нагревание руки происходит не вследствие теплопроводности или конвекции воздуха*. Если вы поставите между рукой и поверхностью печи какую-нибудь преграду, например, кусок картона или доску, вы заметите, что нагревание руки прекратится. Очевидно преграда задержала «нечто», исходящее от печи и падавшее на обращенную к ней поверхность руки. Это «нечто» — невидимые глазом лучи, исходящие от всякого нагретого тела.

Способ передачи тепла посредством лучей называется лучеиспусканием.

Земля нагревается от солнца посредством лучеиспускания, так как, передачи тепла каким-либо иным способом через безвоздушное пространство, отделяющее нашу планету от солнца, быть не может. Воздух же нагревается от земли вследствие образования конвекционных токов.

Возьмите два совершенно одинаковых металлических сосуда. Поверхность одного из них совершенно зачистите, поверхность другого оставьте блестящей. Налейте в сосуды одинаковое количество нагретой воды. Опустите в каждый сосуд по термометру и следите за постепенным понижением температуры. Вы заметите, что быстрее будет охлаждаться вода в том сосуде, поверхность которого покрыта сажей. Этот опыт приводит нас к выводу, что различного рода поверхности обладают неодинаковой способностью испускать переносящие тепло лучи.

Многочисленные опыты и наблюдения показали, что *поверхности темные и шероховатые обладают способностью лучше испускать лучи, нежели поверхности светлые и полированные.*

Нагретая печь, облицованная белым изразцовым кирпичом, остывает крайне медленно, так как она медленно теряет свое тепло лучеиспусканием. Печь же, покрытая темной краской, остывает значительно быстрее.

Те поверхности, которые хорошо испускают тепло, обладают способностью также хорошо поглощать тепло.

§ 202. Законы охлаждения и нагревания. Тело, находящееся в среде, температура которой выше или ниже температуры тела, будет или нагреваться или охлаждаться. Изменение температуры тела будет происходить вследствие целого ряда причин: лучеиспускания, образования конвекционных токов в окружающей тело воздушной среде, а также теплопроводности последней.

Ньютон дал закон, выражающий количество потерянного или приобретенного тепла (Q) телом, поверхность которого S см² в течение n сек, при разности температур тела и среды ($T - t$):

$$Q = hS(T - t) \text{ мал. кал.,}$$

где h — коэффициент пропорциональности, носящий название *коэффициента внешней теплопроводности.*

При $S = 1$ см², ($T - t$) = 1° и $n = 1$ сек.

$$Q = h,$$

т. е. коэффициент внешней теплопроводности выражает количество тепла (малых калорий), потерянного или приобретенного телом с 1 см² его поверхности в течение 1 секунды при разности температур тела и среды в 1°.

Закон Ньютона применим только для небольших разностей температур тела и окружающей среды.

§ 203. Термос. Сосуд Дьюара. Для хранения в течение долгого времени теплой пищи пользуются *термосом* — стеклянным сосудом с двойными стенками, между которыми удален воздух. Их наружная поверхность обычно окружается деревянным футляром.

Удаление воздуха из пространства между стенками сосуда предохраняет содержимое сосуда от быстрого охлаждения.

Подобным образом устраиваются *сосуды Дьюара*, предназначенные для хранения жидкого воздуха. Они также имеют двойные стеклянные стенки (см. рис. 207), между которыми выкачан воздух. Кроме того, поверхность стекла высеребрена.

Удаление воздуха из пространства между стенками предохраняет

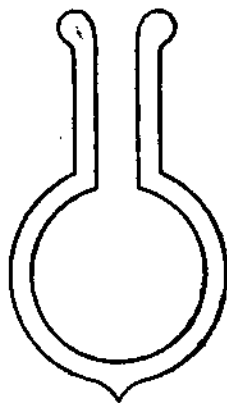


Рис. 207.

содержимое сосуда Дьюара от нагревания путем теплопроводности, посеребренная же поверхность отражает лучи и предохраняет жидкий воздух от нагревания лучеиспусканием. Незначительное нагревание может только происходить сверху, что не особенно опасно, так как при нагревании жидкости сверху не может образоваться конвекционных токов.

§ 204. Вопросы и задачи. 305. Почему ручки чайников часто делают деревянными?

306. Почему паропроводы обычно покрывают деревом или асбестом?

307. Обращали ли вы внимание на то, что если встать босую ногою на металлический лист, то нога почувствует сильный холод, тогда как вставая на ковер, имеющий ту же комнатную температуру, мы не получим такого ощущения? Чем все это объясняется?

308. Как лучше охлаждать волю — сверху или снизу.

309. Почему термометр на солнце показывает всегда более высокую температуру, нежели в тени?

31. Почему весной часто приходится замечать, что на солнце снег тает, а в тени — замерзают лужи?

311. Почему при ветре всегда кажется холоднее?

312. Один конец медного стержня AB (рис. 201) нагрет до 600° , другой конец погружен в сосуд K , в котором находится 2 л воды при 0° . Сосуд медный и весит 500 г. На сколько градусов нагреется вода в сосуде K в течение 5 минут, если длина стержня 0,4 м, а диаметр его 2 см?

313. В доме с площадью стен и крыши 6000 м^2 сжигается 2 т дров в сутки (с теплотворной способностью 3200 бол. кал.). Определить температуру внутри здания, если наружная температура — 15° , толщина стен 0,5 м, а коэфф. внутренней теплопроводности материала стен $k = 0,002$. (Для простоты расчетов будем считать теплопроводность крыши и окон равной теплопроводности стен.)

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ.

РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВАНИИ.

§ 205. Коэффициент линейного расширения. С вопросом о расширении тел при нагревании мы уже довольно подробно познакомились раньше и теперь

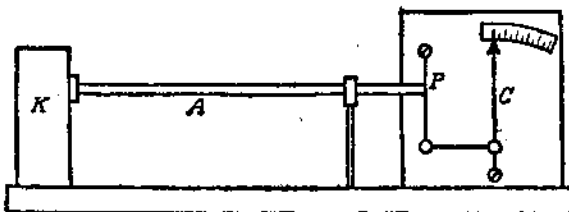


Рис. 208.

никакого не затруднит вспомнить примеры теплового расширения тел: удлинение летом железнодорожных рельсов и сокращение вследствие этого зазоров между ними, по сравнению с величиной этих зазоров зимой, провисание теле-

графной проволоки летом и более сильная натянутость зимой.

Одинаково ли расширяются при нагревании различные тела? Чтобы ответить на этот вопрос, посмотрите на прибор, представленный на рис. 208. Один конец стержня A упирается в неподвижную стойку K , другой конец нажимает на рычаг P , который в свою очередь толкает

стрелку C . При незначительном изменении длины стержня A стрелка C уже заметно отклоняется.

Поставьте сначала железный стержень, подогревайте его пламенем спиртовой лампочки и следите за перемещением стрелки C . Затем, замените его медным стержнем и также подогревайте на пламени спиртовой лампочки. Вы заметите, что стрелка C отклонится больше, нежели в первом случае.

Таким образом, вы приходите к выводу, что железо и медь не одинаково удлиняются при нагревании.

Мы уже отмечали, что удлинение твердых тел пропорционально их первоначальной длине при 0° и температуре нагревания, т. е.

$$l = k L_0 t,$$

где L_0 — первоначальная длина тела при 0° , t — температура нагрева, k — коэффициент пропорциональности, характеризующий способность данного тела удлиняться при нагревании и называемый *коэффициентом линейного расширения*.

При $L_0 = 1 \text{ см}$ и $t = 1^\circ$

$$l = k \cdot 1 \cdot 1,$$

т. е.

$$k = l.$$

Коэффициент линейного расширения равен приращению единицы длины тела при нагревании его на 1° (будем обозначать его буквой α).

Приводим приближенные значения коэффициентов линейного расширения для некоторых веществ.

Тела	α	Тела	α
Алюминий	0,000 0238	Олово	0,000 0267
Бронза	0,000 0175	Платина	0,000 0090
Дерево, поперек волокон	0,000 05	Свинец	0,000 0292
Дерево вдоль волокон	0,000 006	Серебро	0,000 0197
Железо мягкое	0,000 0123	Сталь	0,000 011
» литейное	0,000 0120	Стекло разных сор-	
» сварочное	0,000 0122	тов	от 0,000 004 до 0,000 010
Золото	0,000 0142	Фарфор	0,000 003
Латунь	0,000 0184	Цемент	0,000 014
Медь	0,000 0165	Чугун	0,000 0104

Как найти длину нагретого тела при температуре t° (L_t), если известна длина его при 0° (L_0) и коэффициент линейного расширения α ?

Новая длина L_t равна длине 0° , т. е. L_0 плюс удлинение l :

$$L_t = L_0 + l,$$

или

$$L_t = L_0 + \alpha L_0 t,$$

откуда

$$L_t = L_0(1 + \alpha t).$$

Двучлен $(1 + \alpha t)$ носит название *бинома линейного расширения*. Выведенная выше формула указывает, что для получения длины тела при температуре t° нужно длину при 0° помножить на бином линейного расширения.

Решая выражение $L_t = L_0(1 + \alpha t)$ относительно α , получаем формулу для его определения:

$$\alpha = \frac{L_t - L_0}{L_0 \cdot t}.$$

§ 206. Опытное определение коэффициента линейного расширения. Для определения коэффициента линейного расширения очень удобен прибор, изображенный на рис. 209.

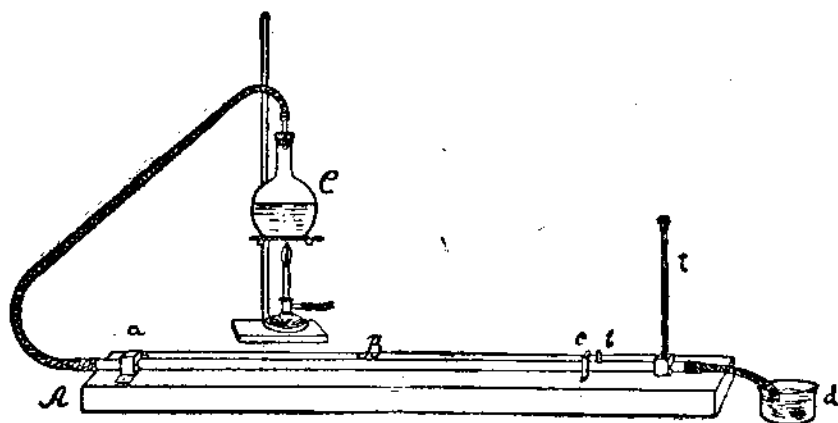


Рис. 209.

Через трубку B , сделанную из испытуемого материала, некоторое время пропускают холодную воду. Через 10—15 минут трубка охладится и примет температуру воды. С помощью термометра t , шарик которого находится внутри трубки, замечают эту температуру. Один конец трубки закреплен, другой может свободно перемещаться, он снабжен выступом b . На подставке A неподвижно закреплен выступ c . Записав температуру (t°), которую приняла трубка, возможно более точно измеряют расстояние между выступами b и c . Затем пропускают через трубку пары кипящей воды. Когда она достаточно нагреется, записывают новую температуру (T°) и вновь измеряют расстояние между выступами b и c .

Предположим, длина трубки от закрепленного конца до выступа b при 0° равна L_0 м.м. Расстояние между выступами b и c при температуре T° оказалось на l м.м. длиннее, чем при температуре t° .

Подставляя в формулу

$$\alpha = \frac{L_t - L_0}{L_0 t}$$

вместо разности длин $L_t - L_0$ приращение длины l мм, найденное нами из опыта, а вместо t° — число градусов нагрева стержня, вызвавшее приращение длины l мм, т. е. $(T - t)^\circ$, имеем:

$$\alpha = \frac{l}{L_0(T - t)}.$$

Из этой формулы и определяют коэффициент линейного расширения α .

Задача 1) Требуется определить длину медной телеграфной проволоки при 30° , если длина ее при $0^\circ = 50\,000$ мм.

Подставляя в формулу $L_t = L_0(1 + \alpha t)$: $L_0 = 50\,000$, $t = 30^\circ$, $\alpha = 0,0000165$, имеем:

$$L_{30} = 50\,000 (1 + 0,0000165 \cdot 30) = 50\,024,75 \text{ мм}$$

2) На рис. 210 изображена доска, в которую вбиты два гвоздика на расстоянии 5 см друг от друга. Медная медаль имеет диаметр при 0° — 4,95 см и свободно проходит между ними. До какой температуры следует ее нагреть, чтобы она застряла между гвоздиками?

Обозначим неизвестную температуру через x и, подставляя вместо L_t , L_0 и α их значения в формулу:

$$L_t = L_0(1 + \alpha t),$$

имеем:

$$5 = 4,95 (1 + 0,0000165 x);$$

$$x \cong 600^\circ.$$



Рис. 210.

§ 207. Применение в технике расширения твердых тел. Расширением твердых тел при нагревании широко пользуются в технике для различных целей.

Если, закрепив стержень, нагревать или охлаждать его, не давая ему изменять первоначальной длины, при этом возникнут значительные напряжения.

Пусть железный стержень длиной $L_0 = 5$ м с площадью поперечного сечения $F = 2 \text{ см}^2$ нагревается на 100° , будучи неподвижно закреплен между двумя стенами.

Расчитаем его удлинение, если бы он мог свободно расширяться:

$$l = \alpha L_0 t = 0,000012 \cdot 5\,000 \cdot 100 = 6 \text{ мм}.$$

Между тем стержень остается при первоначальной длине. Очевидно со стороны стен он испытывает давление, вызывающее его укорочение на 6 мм. По 3-му закону Ньютона давление стены на стержень равно давлению стержня на стену.

Применяя закон Гука, найдем величину такой сжимающей силы, которая могла бы вызвать его укорочение на 6 мм:

$$l = K \cdot \frac{L_0 P}{F},$$

откуда

$$\frac{P}{F} = \frac{1}{K} \cdot \frac{l}{L_0};$$

подставляя вместо $\frac{1}{A}$ модуль Юнга E , равный для железа 2000 000 кг/см², имеем:

$$\frac{P}{F} = 2000\,000 \cdot \frac{6}{5\,000} = 2\,400 \text{ кг} = 2,4 \text{ т.}$$

откуда

$$P = 2,4 \cdot F = 2,4 \cdot 2 = 4,8 \text{ т.}$$

Таким образом стержень давит на стены с силой 4,8 т.

Произведя расчет напряжения, мы могли бы и не указывать первоначальной длины стержня L_0 .

Действительно, удлинение l_1 , вызванное нагреванием, выражается формулой

$$l_1 = \alpha L_0 t.$$

Укорочение l_2 , вызванное сжимающей силой P :

$$l_2 = \frac{L_0 P}{E \cdot F}.$$

Так как $l_1 = l_2$, то

$$\alpha L_0 t = \frac{L_0 P}{E \cdot F},$$



Рис. 211.

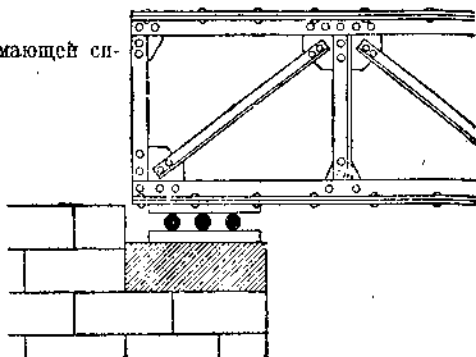


Рис. 212.

и обе части равенства можно сократить на L_0 .

При сжатии предварительно нагретого тела также возникают значительные усилия. Так при склеивании металлических листов раскаленные докрасна заклепки вставляются в отверстия листов и их концы распираются с обеих сторон ударами молота (см. рис. 211). При остывании заклепки стремятся укоротиться и сжимают листы. Расчет давления, производимого заклепками, делается совершенно так же, как в вышеприведенном примере.

Точно так же железная шина, натягиваемая на колесо, или обруч, надеваемый на бочку в горячем состоянии, охлаждаясь, производит сжатие и стягивает колесо или бочку.

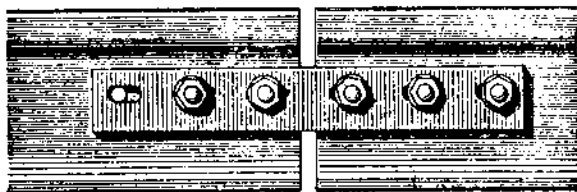
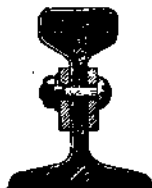


Рис. 213.

§ 208. Вопросы. Ответьте на следующие вопросы:

1. Один конец мостовых ферм неподвижно закрепляется у опор. Другой же конец обычно покоится на катках, которые дают возможность ферме свободно изменять свою длину (см. рис. 212). Для чего делается такое устройство?

2. Почему отверстия для болтов у стыков рельсов делают продолговатыми (рис. 213)?

3. Рассмотрите внимательно лампочку накаливания. Она состоит из стеклянного сосуда, из которого выкачан воздух, и цоколя, которым лампочка ввинчивается в патрон. Внутри лампочки находится угольная или металлическая нить, которая раскаляется при прохождении тока. Концы нити приходится пропаять через стекло, как это показано на рис. 214. Сплавляется, для чего эти концы нити всегда делаются из платины? ¹ (Ответ: коэффициенты объемного расширения стекла и платины приблизительно равны. Таким образом, при нагревании и стекло и платиновая проволочка расширяются почти одинаково. Если же изготовить проволоку из вещества, значительно сильнее расширяющегося от нагревания, чем платина, она может заставить лопнуть стекло.)

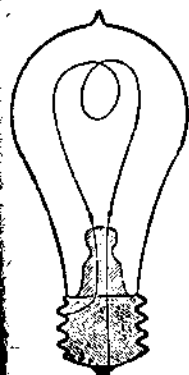


Рис. 214.

4. Если склепать две прямые пластинки из различных металлов с различными коэффициентами линейного расширения, то при нагревании пластинки изогнутся. На рис. 215 изображены пластинки из платины и серебра до нагревания и после нагревания. Почему они изогнулись?

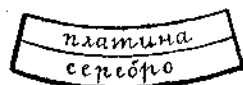
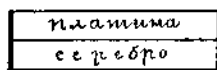


Рис. 215.

§ 209. Коэффициент и вином объемного расширения. При нагревании тел расширение происходит, конечно, не только в одном каком-нибудь направлении, но во все стороны, а следовательно меняется весь объем.

Совершенно так же, как и с изменением длины, опыты показали, что приращение объема (V) прямо пропорционально объему при 0° (V_0) и температуре нагрева (t°), т. е.

$$V = kV_0t.$$

Коэффициент пропорциональности k характеризует способность данного тела увеличивать объем при нагревании, он называется *коэффициентом объемного расширения* и обычно обозначается буквой β .

Подставляя вместо $V_0 = 1$ и $t^\circ = 1^\circ$, имеем:

$$V = \beta \cdot 1 \cdot 1,$$

т. е. коэффициент объемного расширения представляет увеличение единицы объема тела при нагревании его на 1° .

Объем тела при температуре t° (V_t) равен объему при 0° (V_0) плюс приращение объема V :

$$V_t = V_0 + V,$$

$$V_t = V_0 + \beta V_0 t,$$

$$V_t = V_0(1 + \beta t).$$

Выражение $(1 + \beta t)$ называется *биномом объединенного расширения*. Перемножая объем тела при 0° на бином объемного расширения, мы получим его новый объем при температуре t° .

¹ Платину обычно заменяют более дешевым сплавом, имеющим такой же коэффициент расширения.

Из выражения $V_t = V_0 + \beta V_0 t$ легко найти формулу для определения β :

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 \cdot t},$$

§ 210. Связь между коэффициентом линейного и объемного расширения. Большинство некристаллических тел расширяется при нагревании равномерно по всем направлениям.

Возьмем куб, ребро которого при 0° равно 1 см. Очевидно, объем его при 0° равен 1 см³.

При нагревании его на 1° каждое ребро удлинится одинаково и будет равно $(1 + \alpha)$ см, а объем $(1 + \alpha)^3$ см³.

Приращение объема состоит:

$$(1 + \alpha)^3 - 1 = 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

Но приращение объема 1 см³ при нагреве на 1° носит название коэффициента объемного расширения (β).

Следовательно:

$$\beta = 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

Члены $3\alpha^2$ и α^3 чрезвычайно малы по сравнению с членом 3α , и их можно отбросить,¹ в таком случае:

$$\beta = 3\alpha,$$

т. е. коэффициент объемного расширения численно равен утроенному коэффициенту линейного расширения.

§ 211. Изменение удельного веса тел при нагревании. Мы знаем, что молекулы тел при нагревании увеличивают скорость своего движения, как бы расталкивают друг друга, в результате чего объем тела возрастает, а удельный вес, наоборот, убывает. Попробуем теперь установить, каково уменьшение удельного веса тел при повышении их температуры.

Пусть вес некоторого тела при 0° P г; обозначая удельный вес его при этой температуре через d_0 и объем через V_0 , имеем:

$$P = V_0 d_0.$$

Это же тело, нагретое до t° , имеет объем V_t и соответствующий удельный вес d_t .

Так как вес тела при нагревании не меняется, то очевидно:

$$P = V_t d_t$$

или

$$V_0 d_0 = V_t d_t,$$

т. е. произведение объема тела при любой температуре на соответствующий

¹ Пусть кубик сделан из литого железа. В таком случае $\alpha = 0,000012$.

$\beta = 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3 = 0,000036 + 0,000000000432 + 0,000000000001728$.

Легко видеть, что члены $3\alpha^2$ и α^3 ничтожно малы по сравнению с членом 3α и должны быть отброшены, так как не имеют реального значения.

удельный вес есть величина постоянная. Но $V_t = V_0 (1 + \beta t)$, следовательно:

$$V_0 d_0 = V_0 (1 + \beta t) d_t$$

откуда

$$d_0 = (1 + \beta t) d_t$$

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \beta t}$$

т. е. удельный вес тела при t равен удельному весу при 0° , деленному на бином объемного расширения.

§ 212. Расширение сосудов. Возьмите стеклянный сосуд с узким горлышком и наполните его водой. Осторожно водите сосудом над пламенем лампочки, подогревая его по возможности равномерно со всех сторон. Вы заметите, что уровень воды понизился. Это произошло оттого, что стекло от нагревания расширилось и емкость сосуда возросла. Вода же еще не успела нагреться (стекло плохой проводник тепла), и объем ее остался прежний. При дальнейшем нагревании, когда вода тоже прогреется, уровень ее начнет повышаться, так как коэффициент объемного расширения воды больше, чем у стекла.

Наше заключение не об увеличении емкости сосудов при нагревании на первый взгляд кажется странным. Вы, вероятно, думаете, что при повышении температуры стенки сосуда делаются толще и, вследствие этого, емкость уменьшается?

Попробуем простым рассуждением доказать неправильность такого заключения.

Предположим, что весь стеклянный сосуд был бы сплошь наполнен стеклом. От нагревания он расширился бы как одно целое, и стекло, которым мы его заполняли, не производило бы на стенки сосуда никакого давления. Новый объем этой части стекла увеличился бы на некоторую величину. Если теперь удалить эту часть стекла, то расширение сосуда не должно измениться, так как стекло не производило на стенки никакого давления. Таким образом, *емкость сосуда возрастает при нагревании совершенно так же, как увеличивается объем сплошного тела, заполняющего всю внутренность сосуда.*

§ 213. Расширение жидкостей. Налейте в колбу с узким горлышком какую-нибудь жидкость, измерьте ее температуру и отметьте уровень жидкости с помощью резинового колечка *a* (рис. 216). Начните нагревать жидкость и следите за повышением температуры и изменением уровня жидкости.

Заметьте какую-нибудь температуру и отметьте другим резиновым кольцом *b* новый горизонт жидкости.

Зная первоначальный объем жидкости, емкость сосуда между уровнями *a* и *b*, число градусов нагрева и коэффициент расширения стекла, легко определить коэффициент объемного расширения жидкости.

Пусть требуется определить коэффициент объемного расширения спирта. Опыт показал, что 400 см³ спирта в стеклянном сосуде при нагревании от 0° до 50° увеличился в объеме на 21,6 см³.

Сначала не будем принимать во внимание расширения стенок сосуда.

Если 400 см³ спирта при нагревании на 50° увеличился в объеме на 21,6 см³, то 1 см³ спирта, нагреваясь на 1° , получил бы увеличение объема, равное:

$$\frac{21,6}{400 \times 50} = 0,00108.$$



Рис. 216.

Очевидно, истинный коэффициент расширения спирта больше полученного нами на величину коэффициента расширения стекла:

$$0,000\,008 \times 3 = 0,000\,024.$$

Таким образом, истинный коэффициент расширения спирта:

$$0,00108 + 0,000\,024 = 0,001\,104 = \sim 0,0011.$$

§ 214. Определение коэффициентов объемного расширения жидкостей по способу Дюлонга и Пти. Чтобы устранить влияние расширения стенок сосуда, в котором находится жидкость, Дюлонг и Пти предложили следующий метод определения коэффициентов объемного расширения жидкостей.

Испытуемая жидкость помещалась в два сообщающихся сосуда *A* и *B* (рис. 217), соединенных между собою капиллярной трубкой. Один из сосудов (*A*) окружался тающим льдом, а другой (*B*) прогревался парами кипящей воды.

Удельный вес жидкости в сосуде *A* был равен d_0 , а в сосуде *B* — d_t , где t — температура паров кипящей воды.

Очевидно

$$d_t < d_0.$$

В сообщающихся сосудах жидкости разных удельных весов имеют высоты обратно пропорциональные их удельным весам, т. е.

$$\frac{h_t}{h_0} = \frac{d_0}{d_t},$$

Рис. 217.

где h_t — высота жидкости в сосуде *B* при t° , а h_0 — высота ее в сосуде *A* при 0° .

Произведение крайних членов пропорции равно произведению средних, т. е.

$$h_t d_t = h_0 d_0.$$

Представляя вместо d_t

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \beta t},$$

имеем:

$$h_t \frac{d_0}{1 + \beta t} = h_0 d_0,$$

или

$$\frac{h_t}{1 + \beta t} = h_0,$$

$$h_t = h_0(1 + \beta t),$$

откуда

$$\beta = \frac{h_t - h_0}{h_0 \cdot t},$$

е. для определения коэффициента объемного расширения жидкостей достаточно измерить их высоты h_0 и h_t и температуру t° . Расширение же стенок сосудов учитывать не приходится, так как формула

$$\frac{h_t}{h_0} = \frac{d_0}{d_t}$$

динаково справедлива при всяких площадях сечения сосудов A и B (если это не капиллярные трубки).

Приводим коэффициенты объемного расширения некоторых жидкостей

Жидкости	β
Бензин	0,00121
Глицерин	0,00050
Керосин	0,00099
Ртуть	0,00018
Спирт винный	0,00110
Хлороформ	0,00126
Эфир	0,00163

§ 215. Устройство термометров. Устройство термометров основано на расширении жидкостей при нагревании. Ниже мы приводим их описание.

1. *Ртутный термометр*. Изобретение термометра относится к концу XVI столетия и приписывается Галилею.

Из всех термометров наибольшее распространение получил ртутный. Он состоит из тонкой стеклянной или кварцевой трубки с резервуаром в нижней части.

Каким образом производится наполнение резервуара и части трубки ртутью? К верхней части трубки припаивают воронку C (рис. 218), в которую наливают ртуть; нагревая резервуар D , заставляют находящийся в нем воздух расширяться, вследствие чего часть его выходит через воронку C ; затем резервуар охлаждают, воздух сжимается, при этом из воронки выходит некоторое количество ртути. Повторяя последовательно нагревания и охлаждения несколько раз, достигают полного наполнения резервуара и части трубки. Потом начинают кипятить ртуть в резервуаре; с ее парами уносятся остатки воздуха и водяных паров, далее отламывают воронку и запаивают конец трубки.

Термометр готов; нужно только нанести деления на шкалу, которая прикрепляется к трубке. Для этой цели сначала помещают термометр в тающий лед и против того места, где останавливается ртуть в трубке, ставят 0° , затем помещают его в пары кипящей воды (при нормальном атмосферном давлении) и ставят в соответствующее место 100° . Пространство между 0° и 100° делят на 100 равных частей. Такие же деления (градусы) откладывают ниже 0° , именуя температурами ниже нуля отрицательной (или холода).

Изготовленный таким образом термометр носит название *термометра Цельсия*, он применяется в науке и в обыденной жизни большинства европейских стран. С введением метрической системы у нас СССР вводится также термометр Цельсия вместо применявшегося ранее термометра Реомюра, шкала которого разделена от температуры тающего льда до температуры паров кипящей воды на 80 частей.

Не трудно перевести показания по шкале Реомюра (t_R°) на соответствующие показания по шкале Цельсия (t_C°).

Очевидно

$$t_C^\circ = \frac{5}{4} t_R^\circ$$



Рис. 218.

Для обратного перехода служит формула:

$$t_R^{\circ} = \frac{4}{5} t_C^{\circ}.$$

В Англии и Америке получили распространение термометры Фаренгейта. Температура таящего льда отмечается на шкале этого термометра 32° , температура паров кипящей воды (при нормальном атмосферном давлении) 212° . Нуль шкалы Фаренгейта с ответствует температуре особ и охлаждающей смеси.

Так как 180 делений шкалы Фаренгейта соответствуют 100 делениям шкалы Цельсия, то каждое одно деление шкалы Фаренгейта равно $\frac{5}{9}$ деления шкалы Цельсия.

Для перевода показаний со шкалы Фаренгейта (t_F°) на шкалу Цельсия (t_C°) следует воспользоваться следующей зависимостью

$$t_C^{\circ} = (t_F^{\circ} - 32^{\circ}) \frac{5}{9}$$

Для обратного перехода:

$$t_F^{\circ} = \frac{5}{9} t_C^{\circ} + 32^{\circ}$$

Следует иметь в виду, что температура замерзания и кипения растворов отличается от соответствующих температур для чистой воды, поэтому необходимо при нанесении постоянных точек термометра следить за тем, чтобы таящий лед был изготовлен из чистой воды; точно так же подвергаться кипячению должна вода, не содержащая в растворе какой-либо примеси.



Хороший термометр должен отличаться *верностью* и *чувствительностью*. Для верности термометра необходимо, чтобы воздух над поверхностью ртути был тщательно удален и чтобы внутренний диаметр трубки был всюду одинаков. Для чувствительности термометра (т. е. для того, чтобы он быстро реагировал на малейшие изменения температуры) нужно брать тонкую трубку и резервуар большого объема с возможно большей поверхностью. При температуре -39° ртуть замерзает, а при $+357^{\circ}$ кипит; следовательно, ртутным термометром можно пользоваться для измерения температур в пределах от -39° до $+357^{\circ}$.

2. *Спиртовой термометр*. Для измерения более низких температур вместо ртути пользуются *спиртом*. Спирт замерзает при -130° , а кипит при $+78^{\circ}$. Чтобы уровень спирта был более заметен, его подкрашивают яркой синей или красной краской.

Рис. 219. 6° на шкале спиртового термометра наносится точно так же, как и у ртутного; что касается верхнего предела, то его берут равным 50° , 60° или 70° (обязательно менее $+78^{\circ}$). В сосуд с водой помещают одновременно ртутный термометр с уже готовой шкалой и спиртовой.

Как только ртутный термометр покажет $+50^{\circ}$, $+60^{\circ}$ или $+70^{\circ}$, ставят соответствующее число градусов в том месте, где устанавливается уровень спирта в спиртовом термометре.

3. *Максимальный и минимальный термометр*. Предположим, нужно измерить температуру тела больного. Если для этой цели воспользоваться обыкновенным термометром, то придется встретиться с затруднением такого рода: как только термометр будет удален от тела больного, окружающий воздух начнет охлаждать ртуть в нем, и уровень ее станет понижаться. Необходимо изготовить особый термометр, уровень ртути в котором показывал бы температуру тела больного даже по удалении термометра от него. Это достигается тем, что резервуар соединяется с трубкой чрезвычайно узким каналом. Нагреваясь от соприкосновения с телом больного, ртуть из резервуара проходит через этот канал в трубку. При охлаждении же ртуть из трубки назад в резервуар не затекает, оставаясь почти на той же высоте, которой она достигла при расширении, так как силы ее

веса недостаточно для преодоления трения в узком канале. Чтобы загнать ртуть обратно в резервуар, нужно несколько раз встряхнуть термометр. Описанного устройства *медицинский термометр* носят название *максимального* (рис. 219), так как он дает возможность наблюдать наивысшую температуру.

Метеорологи, которым важно знать наивысшую и наивысшую температуру за сутки или некоторый иной промежуток времени, чаще всего пользуются *максимальным и минимальным термометрами*, изображенными на рис. 220. Верхний из них служит для указания наивысшей температуры. Шарик и часть трубки наполнены ртутью, при повышении температуры ртуть расширяется и толкает железный цилиндр, который останавливается в месте, соответствующем наибольшей температуре. Назад этот цилиндр может быть возвращен с помощью магнита или встряхиванием.

Нижний минимальный термометр отмечает наименьшую температуру. Его шарик и часть трубки наполнены спиртом; в трубку введен эмалированный цилиндр. При понижении температуры столб спирта увлекает за собою прилипающий к нему

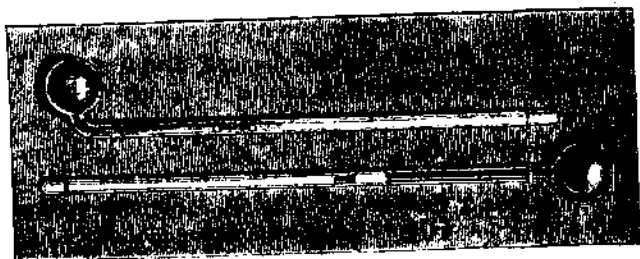


Рис. 220.

эмалированный цилиндр, при повышении же температуры спирт свободно проходит между цилиндриком и стенками трубки, оставляя его на месте.

§ 216. Особенность расширения воды. Вода отличается очень интересной особенностью. При повышении температуры от 0° до 4° она не расширяется, а наоборот, сжимается. Лишь при дальнейшем нагревании от 4° она начинает расширяться.

Таким образом, при 4° вода занимает наименьший объем и имеет самый большой удельный вес.

Эта неправильность в расширении воды играет чрезвычайно важную роль в жизни природы.

При наступлении зимы поверхность воды в реках и озерах начинает охлаждаться. Более холодные и тяжелые слои воды сверху опускаются вниз, на их смену поднимаются сверху более теплые части воды. Образуются конвекционные токи. Так охлаждается вода до тех пор, пока температура ее в нижних слоях не сделается равной 4° . При дальнейшем охлаждении верхние слои воды расширяются, их удельный вес уменьшается и они, как более легкие, не опускаются вниз. Понижение температуры нижних слоев может происходить только посредством теплопроводности, но вода плохой проводник тепла и на большой глубине температура воды остается $+4^{\circ}$ в течение всей зимы. Благодаря этому достаточно глубокие реки и озера даже на крайнем севере не промерзают до дна, что имеет очень большое значение для жизни рыб.

§ 217. Расширение газов. Возьмите колбу, наполните ее приблизительно до половины какой-нибудь жидкостью, заткните отверстие

резиновой пробкой, в которую вставлена стеклянная трубочка так, как это показано на рис. 221, и поверните колбу. Вы получите прибор, с помощью которого легко показать расширение газов при повышении температуры. Положите руку на дно колбы, воздух в ней нагреется, и расширяясь, заставит жидкость подниматься по трубке.

Сравнивая увеличение в объеме при нагревании тел твердых, жидких и газообразных, вы легко придете к выводу, что эти последние расширяются значительно больше.

Французский физик Гэ-Люссак установил, что все газы расширяются одинаково и их коэффициент объемного расширения

равен $\frac{1}{273}$, если давление, под которым газ находится, остается неизменным (закон Гэ-Люссака).

§ 218. Закон Бойля-Мариотта — Гэ-Люссака. Как изменится объем газа, если одновременно меняются и температура и давление, под которым он находится?

Как ответить на этот вопрос? Мы знаем, что объем газа обратно пропорционален давлению, под которым этот газ находится (закон Бойля-Мариотта). Но ведь этот закон применим только для случая, когда температура газа не изменяется.

Предположим, что мы имеем при 0° некоторый объем газа, например, 1000 см^3 , находящийся под давлением в 760 мм ртутного столба.

Требуется найти его объем при давлении 800 мм и температуре $+30^\circ$.

Если бы сначала изменилось только давление, а температура осталась неизменной, то мы могли бы воспользоваться законом Бойля-Мариотта и написать, обозначая новый объем через x :

$$x \times 800 = 1000 \times 760,$$

откуда

$$x = \frac{1000 \times 760}{800}.$$

Если теперь этот газ нагреть до $+30^\circ$, то его окончательный объем (y) будет равен объему при 0° (x), умноженному на бином объемного расширения, что составляет для газов $\left(1 + \frac{1}{273} t\right)$:

$$y = x \left(1 + \frac{1}{273} t\right);$$

подставляя вместо x его значение, имеем:

$$y = \frac{1000 \times 760}{800} \left(1 + \frac{30}{273}\right) = 1054 \text{ см}^3.$$

Обозначим объем газа при 0° через V_0 , а соответствующее давление через P_0 , объем же и давление газа при t° через V_t и P_t .

Предполагая, что, как и в предыдущем примере, сначала изменилось только давление, температура же осталась прежняя, т. е. 0° , мы можем применить закон Бойля-Мариотта:

$$V_0 P_0 = V P_0,$$

где V — объем, соответствующий новому давлению P_t и прежней температуре 0° .

При изменении затем температуры от 0° до t° объем изменится согласно закону Гэ-Люссака, так как давление осталось прежнее:

$$V_t = V(1 + \beta t),$$

$$\beta = \frac{1}{273};$$

$$V = \frac{V_t}{1 + \beta t};$$

подставляя в первую формулу вместо V его значение, получим окончательно:

$$V_0 P_0 = \frac{V_t P_t}{1 + \beta t}.$$

По этой формуле мы всегда сумеем найти искомый объем V_t .

Рассуждая совершенно аналогично, для любых давлений P_t' , P_t и т. д. для нагревания газа до температуры t' или t'' , получим:

$$V_0 P_0 = \frac{V_t' P_t'}{1 + \beta t'} = \frac{V_t'' P_t''}{1 + \beta t''} = \text{и т. д.},$$

т. е. произведение из объема газа на соответствующее давление, деленное на бином объемного расширения, есть для данной массы газа величина постоянная. Это положение носит название закона Бойля-Мариотта — Гэ-Люссака и может быть выражено формулой:

$$\frac{V_t P_t}{1 + \beta t} = V_0 P_0 = \text{постоянная}.$$

§ 219. Абсолютный нуль температуры. Зададимся целью выяснить, как изменяется давление газа в том случае, если он нагревается, сохраняя неизменный объем.

Из формулы:

$$V_0 P_0 = \frac{V_t P_t}{1 + \beta t},$$

подставляя $V_0 = V_t$, получим:

$$P_0 = \frac{P_t}{1 + \beta t},$$

или

$$P_t = P_0 (1 + \beta t),$$

т. е. давление, под которым газ находится при температуре t° , равно давлению его при 0° , помноженному на бином объемного расширения газов ($\beta = \frac{1}{273}$), если объем газа при этом остался без изменения.

Если температура газа, занимающего постоянный объем, понижается, то его давление также соответственно убывает. При какой температуре это давление газа делается равным нулю?

Если произведение двух множителей равно нулю, то один из них равняется нулю. Так как P_0 не равно нулю, то

$$1 + \beta t = 0,$$

откуда

$$t = -\frac{1}{\beta};$$

подставляя

$$\beta = \frac{1}{273},$$

получим:

$$t = -273^\circ.$$

Итак, при температуре -273° давление любого газа должно обратиться в нуль. Так как давление газа обуславливается кинетической энергией его движущихся частиц, то при температуре -273° эта энергия должна обратиться в нуль. Эта температура носит название *абсолютного нуля*.

Температура, отсчитанная от абсолютного нуля, называется *абсолютной температурой*. Легко сообразить, что для получения абсолютно температуры (T°) следует к температуре, отсчитываемой по шкале Цельсия (t°), прибавить 273° :

$$T^\circ = t^\circ + 273^\circ.$$

Например, 17°C соответствуют $17 + 273 = 290^\circ$ абсолютной температуры.

§ 220. Уравнение Клайперона. Введем некоторые преобразования в формулу закона Бойля-Мариотта — Гэ-Люссака:

$$V_0 P_0 = \frac{V' P'}{1 + \beta t'} = \frac{V'' P''}{1 + \beta t''}.$$

Прежде всего вместо β подставим его значение

$$\beta = \frac{1}{273};$$

$$V_0 P_0 = \frac{V' P'}{1 + \frac{t'}{273}} = \frac{V'' P''}{1 + \frac{t''}{273}}$$

или

$$V_0 P_0 = \frac{273 V' P'}{273 + t'} = \frac{273 V'' P''}{273 + t''},$$

но $273 + t'$ есть абсолютная температура T' , точно так же

$$273 + t'' = T'',$$

следовательно:

$$V_0 P_0 = \frac{273 V_P P_P}{T} = \frac{273 V_{P''} P_{P''}}{T''}$$

$$\frac{V_0 P_0}{273} = \frac{V_P P_P}{T} = \frac{V_{P''} P_{P''}}{T''},$$

то 273° по абсолютной шкале соответствует 0° С, т. е. T_0 .

Итак,

$$\frac{V_0 P_0}{T_0} = \frac{V_P P_P}{T} = \frac{V_{P''} P_{P''}}{T''},$$

т. е. произведение из объема газа на соответствующее давление, деленное на его абсолютную температуру, есть для данной массы газа величина постоянная.

Называя эту постоянную R , получим:

$$\frac{P V}{T} = R,$$

$$P V = R T.$$

Это равенство носит название *уравнения Клапейрона* или *уравнения постоянной газа*.

Величина R , входящая в уравнение Клапейрова, носит название *газовой постоянной*. Ее численное значение зависит только от массы и рода газа.

Для примера вычислим постоянную R для массы воздуха в 1 кг.

Найдем объем V , который занимает 1 кг воздуха при 0° и нормальном атмосферном давлении $P = 1,0330 \text{ кг/см}^2 = 10\,330 \text{ кг/м}^2$. Так как удельный вес воздуха при этих условиях $d = 0,001293 \text{ г/см}^3 = 1,293 \text{ кг/м}^3$, то объем воздуха V в кубических метрах равен:

$$V = \frac{1}{1,293} \text{ м}^3.$$

Подставляя вместо T абсолютную температуру, соответствующую заданным условиям, т. е. температуре 0° по шкале Цельсия,

$$T = 273^\circ$$

и вместо

$$P = 10\,330 \text{ кг/м}^2,$$

имеем:

$$R = \frac{P V}{T} = \frac{10\,330}{1,293 \cdot 273} = 29,28 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{1^\circ}.$$

§ 221. Приведение объема газа к нормальным условиям. При решении различных задач с газами часто приходится приводить объем газа к нормальным условиям, т. е. находить тот объем, который занимала бы данная масса газа при 0° и атмосферном давлении 760 мм ртутного столба. Для этой цели можно воспользоваться формулой объединенных законов Бойля-Мариотта — Гэ-Люссака или формулой Клапейрона.

Пусть газ занимал объем 5 л, находясь при давлении 720 мм и при температуре 27°. Требуется этот объем привести к нормальным условиям.

В формулу

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_P V_P}{T}.$$

подставим вместо P_0 — 760 мм, P_P — 720 мм, V_P — 5 л, T_0 — 273°, T — 273° + 27° = 300° и найдем искомое:

$$V_0 = \frac{P_P V_P T_0}{P_0 T} = \frac{720 \cdot 5 \cdot 273}{760 \cdot 300} \cong 4,81 \text{ л}.$$

§ 222. Теплоемкость газа при постоянном давлении и при постоянном объеме. Для нагревания газа в замкнутом сосуде, т. е. при постоянном объеме, требуется затратить меньше тепла, чем в том случае, если сосуд имеет подвижной поршень, который при расширении газа начинает подниматься. В первом случае тепло расходуется только на нагревание газа, а во втором случае помимо нагревания часть тепла идет на совершение работы по преодолению давления при поднятии поршня.

Теплоемкость газа при постоянном объеме обозначается C_v . Теплоемкость газа в том случае, когда газ может при нагревании расширяться, сохраняя неизменным давление и совершая работу, обозначается C_p .

Приводим данные о теплоемкостях различных газов.

Наименование газа	C_p	C_v
Азот	0,25	0,18
Водород	3,41	2,42
Воздух	0,24	0,17
Кислород	0,22	0,16
Оксид углерода	0,25	0,18

Отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости газа при постоянном объеме для целого ряда газов приблизительно равно 1,41, т. е.

$$\frac{C_p}{C_v} = 1,41.$$

§ 223. Определение механического эквивалента тепла Робертом Майером. Роберт Майер дал очень интересный метод определения механического эквивалента тепла, основываясь на отношении $\frac{C_p}{C_v} = 1,41$. Это определение механического эквивалента тепла теоретическим путем Роберт Майер сделал еще до классических опытов Джоуля. Однако, так как он исходил из неверных данных для C_p и C_v , то полученный им результат не отличался точностью.

Попробуем теперь мы сами вычислить механический эквивалент теплоты по способу Роберта Майера.

Предположим, в цилиндре находится при 0° и нормальном атмосферном давлении 1 м³ воздуха.

Так как при нагревании газов на 1° их объем возрастает на $\frac{1}{273}$, то для того, чтобы заставить газ расширяться вдвое, необходимо его нагреть на 273° . Расширяясь, газ станет поднимать поршень (весом поршня, а также трением его о стенки цилиндра мы пренебрегаем), совершая работу против атмосферного давления.

На поверхности поршня в 1 м² давление атмосферы равно 10 330 кгс.

При поднятии поршня на высоту 1 м совершается следовательно работа в $10\,330 \times 1 = 10\,330$ кгм.

Количество тепла, израсходованное на нагревание 1 м³ воздуха (он весит при 0° и нормальном атмосферном давлении 1,29 кг) от 0° до 273° , если обозначать теплоемкость воздуха при постоянном давлении через C_p , выражается таким числом:

$$Q = 1,293 \times 273 \times C_p = 353 C_p;$$

часть этой работы пошла на повышение температуры воздуха, часть на совершение работы для поднятия поршня. Назовем первую часть всего расхода тепла через Q_1 , а вторую через Q_2 :

$$Q_1 = 1,293 \times 273 \times C_v = 353 C_v$$

где C_v — теплоемкость воздуха при постоянном объеме.

Q_2 , равноценное 10 330 ккал работы, равно x бол. калорий:

$$Q = Q_1 + Q_2;$$

$$353 C_p = 353 C_v + x;$$

$$x = 353 (C_p - C_v).$$

Теплоемкость воздуха при постоянном давлении $C_p = 0,2375$;

$$C_p = \frac{1}{1,41} \cdot 0,2375 = 0,1690;$$

$$x = 353 (0,2375 - 0,1690) = 24,18 \text{ бол. кал.}$$

Итак, количество тепла в 24,18 бол. кал. пошло на совершение работ в 10 330 ккал. Отсюда легко вычислить, что 1 бол. кал. равноценна работе в

$$\frac{10330}{24,18} = 427 \text{ ккал.}$$

Так как Роберт Майер исходил из точных данных, то определенный им механический эквивалент соответствовал всего лишь 367 ккал.

§ 224. Вопросы и задачи. 314. Длина мостовой железной фермы 100 м. На сколько изменяется она при колебании температуры от -30° до $+50^\circ$?

315. Укладка железнодорожных стальных рельсов производилась при 0° . Наибольшая возможная температура местности 50° . Какой величины нужно было оставлять во время укладки зазоры, если длина каждого рельса 9 м?

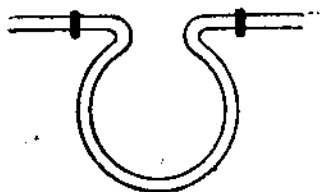


Рис. 222.

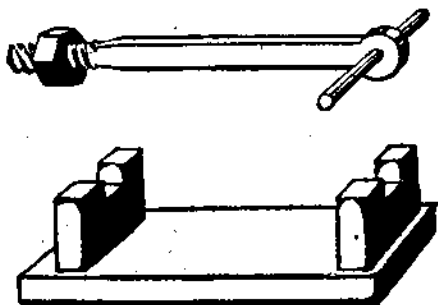


Рис. 223.

316. Какую цель преследует устройство петель в паропроводе (см. рис. 222).

317. Для чего одна опора паровых котлов делается подвижной?

318. На рис. 223 изображен прибор английского ученого Тандала. Железный брусок с площадью поперечного сечения около 10 кв. см. имеет на одном конце винтовую нарезку, на которую надевается гайка, на другом — кольцо со вставленным туда тонким чугунным стержнем.

Брусок укладывается в прорезы толстостенной чугунной стойки и подвинчиванием гайки плотно закрепляется в ней. Затем нагревают брусок спиртовой лампочкой. Он удлиняется и закрепление его ослабевает. Подвигивают гайку, вновь добиваясь плотного закрепления бруска в стойке. При прекращении нагревания, стержень в кольце ломается. Чем объясняется это явление?

319. При обработке на токарном станке железного цилиндра он нагрелся до 70° . Его диаметр при этом равен 10 см. Чему будет равен его диаметр при комнатной температуре 20° ?

320. Деления по затупной масштабной линейке были нанесены при 15° . С помощью этой линейки было произведено измерение при 30° . Длина тела при этом оказалась равной 50 см. Какова ошибка?

321. Медный лист имеет при 0° длину 20 см и ширину 15 см. Какова его площадь при 200° ?

322. Считая, что толщина медного листа, указанного в предыдущей задаче, при 0° 3 см, найти, на сколько кубических сантиметров увеличится его объем при повышении температуры до 100° ?

323. Кусок цинка при 0° занимает объем 1000 см³. Какой объем он займет при 300° ? (коэфф. линейного расширения цинка $\alpha = 0,000029$).

324. Железный куб имеет ребра при 0° по 100 см. Найти его объем при 500° .

325. При какой температуре удельный вес цинка будет равен $7\frac{2}{3}$ г/см³?

326. Найти удельный вес железа при 400° .

327. Если налить в магазине полную бутылку керосина и поставить ее в теплую комнату, то часть керосина выльется. Почему это происходит? Если плотно закупорить бутылку пробкой, то пробка окажется выбитой или лопнет бутылка. Какова причина этого явления?

328. Найти изменение объема 500 см³ эфира при нагревании от 0° до 80° ?

329. На сколько градусов нужно нагреть ртуть, чтобы ее объем увеличился на 0,05 того объема, который она занимает при 0° ?

330. На сколько градусов нужно нагреть 5 л керосина, чтобы они заняли объем 5,2 л?

331. Стеклопая колба имеет горлышко с поперечным сечением 1 см². Ртуть занимает объем при 0° 200 см³. На сколько повысится ее уровень при повышении температуры до 80° ?

332. Длина комнаты 10 м, ширина 6 м, высота 5 м. Какой объем воздуха выйдет из комнаты, если температура повысится с 0° до 10° ?

333. При температуре -25° и давлении 775 мм воздух занимает объем 5 л. Приведите этот объем к нормальным условиям.

334. Резиновый шар содержит 2 л воздуха, находящегося при температуре 20° и под давлением 780 мм. Какой объем займет этот воздух, если шар будет опущен в воду на глубину 10 м? Наружное атмосферное давление 750 мм. Температура воды 4° .

335. 10 л газа при давлении в 1 кг/см² и при температуре 27° заключены в цилиндр. Затем этот газ подвергают сжатию, причем температура его повышается до 227° , а новый объем становится равным $\frac{1}{10}$ л. Определить, с какой силой надо надавить на клапан с радиусом 2 см, открывающийся внутрь цилиндра, чтобы воздух стал выходить из цилиндра наружу.

336. Трубка, вся длина которой 15 см, открытым концом опущена в ртуть, причем под уровнем ртути находится часть трубки в 2 см. Длина столбика ртути, выступающего над уровнем ртути в сосуде, равна 3 см. Над ртутью в трубке находится воздух при 27° . Наружное атмосферное давление 75 см. До какой температуры надо нагреть газ, чтобы уровень ртути в трубке опустился до уровня ее в сосуде?

337. Два стеклянных шара А и В (рис. 224) соединены трубкой С. При 0° капля ртути к находится посередине трубки С. Объем воздуха в шаре А и части трубки С до капли ртути 500 см³, соответствующий объем воздуха в шаре В — 300 см³. На сколько сантиметров передвинется капля ртути по трубке С, если шар А нагреть до $+10^\circ$, а шар В охладить до -5° ? Расширение стенок шаров в расчет не вводить. Площадь поперечного сечения трубки С равна 25 мм².



Рис. 224.

338. Следующие абсолютные температуры переведите на шкалу Цельсия: 1) 600° , 2) 450° , 3) 280° , 4) 200° , 5) 128° .

339. Следующие температуры по шкале Цельсия переведите на абсолютные: 1) -25° , 2) 0° , 3) $+43^\circ$, 4) $+541^\circ$.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ.

ПЕРЕХОД ТЕЛ ИЗ ОДНОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ.

§ 225. Законы перехода тел из одного состояния в другое. Возьмите какой-нибудь сосуд, наполните его льдом и начните подогревать. С помощью термометра следите за температурой и записывайте результаты своих наблюдений. Лучше всего построить график, который покажет нам наглядно изменение температуры с течением времени. На оси X откладывайте время, на оси Y — соответствующую температуру; наблюдения производите через каждые $\frac{1}{2}$ минуты (рис. 225).

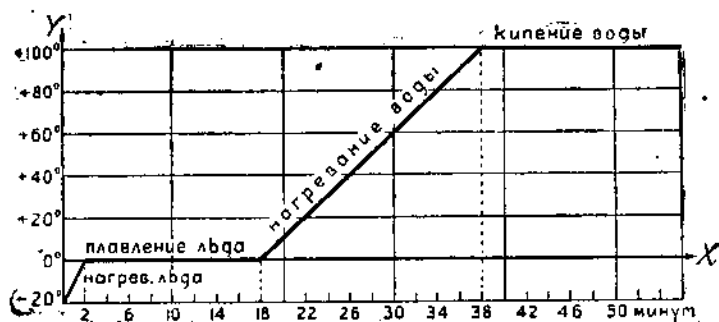


Рис. 225.

В первый момент лед имел температуру -20° , через $\frac{1}{2}$ минуты он нагрелся до -15° , еще через $\frac{1}{2}$ минуты температура возросла до -10° , потом до -5° и, наконец, остановилась на 0° . Далее лед начал таять, и в течение 16 минут температура не изменилась, все время термометр показывал 0° , затем в течение 20 минут происходило нагревание воды до 100° , после чего она закипела, и температура перестала изменяться.

Сохраним этот график и проделаем опыт еще несколько раз. Новые графики будут совершенно такие же: при 0° начинается плавление льда, во время этого процесса температура остается постоянной; при 100° вода начинает кипеть, все время сохраняя неизменной температуру кипения.

Возьмите теперь свинцовые опилки, насыпьте их в тигелек, опустите туда термометр и начните нагревание. Записывая через каждые полминуты соответствующую температуру, вы получите график, представленный на рис. 226.

При 330° свинец начал плавиться, причем во время плавления температура оставалась неизменной. Прекратив нагревание, вы заставите расплавленный свинец остывать, понижение температуры с

течением времени изображает график на рис. 227. При 330° свинец начал затвердевать, сохраняя эту температуру до тех пор, пока он весь не обратился в твердое состояние.

На основании многочисленных опытов можно прийти к следующим заключениям:

1. Всякое тело переходит из одного состояния в другое при определенной (для данного давления) температуре. Так, вода

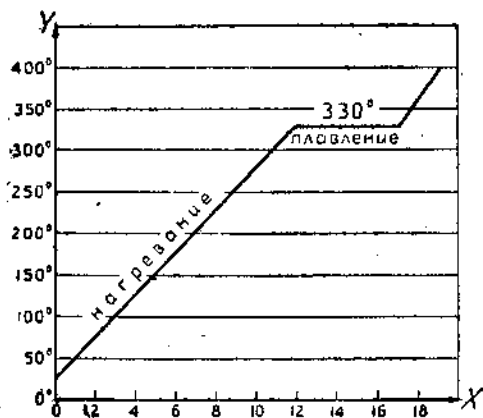


Рис. 226.

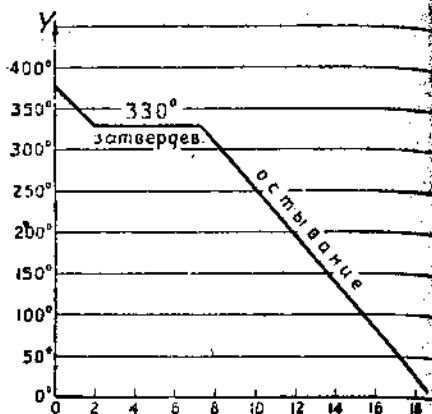


Рис. 227.

при нормальном атмосферном давлении всегда кипит при 100° , лед плавится при 0° , свинец плавится при 330° и т. д.

Вот температуры плавления и кипения (при нормальном атмосферном давлении) некоторых тел:

Температура плавления

Алкоголь (спирт)	130°
Ртуть	39°
Лед	0°
Сера	113°
Олово	242°
Висмут	272°
Кадмий	321°
Свинец	330°
Серебро	960°
Золото	1064°
Медь	1083°
Железо	1520°
Платина	1772°
Вольфрам	около 3000°

Температура кипения

Эфир	35°
Алкоголь (спирт)	78°
Вода	100°
Керосин	110°
Скипидар	160°
Нафталин	218°
Глицерин	290°
Льняное масло	316°
Ртуть	357°
Сера	444°
Цинк	930°
Свинец	1600°
Жидкий водород	253°
Жидкий кислород	183°

Наш опыт с плавлением и затвердеванием свинца показал, что оба эти явления происходят при 330° ; точно так же и для других тел процесс плавления и затвердевания происходит при одной и той же температуре. Температура кипения и ожигения (обратный переход пара в жидкое состояние) тоже общая для обоих явлений.

2. Взгляните на наши графики. Пока плавился лед, температура была все время 0° , при кипении воды термометр неизменно показывал 100° ; пока плавился и затвердевал свинец, температура была 330° и т. д.

Итак, во время перехода тел из одного состояния в другое температура постоянна.

3. Когда мы начали нагревать на спиртовой лампочке лед, температура его некоторое время повышалась, затем при 0° началось плавление — спирт сгорал, выделялось тепло, однако, температура не поднималась. На что же это тепло расходовалось? На совершение процесса плавления льда. Твердые тела имеют большую, чем жидкости, связь между молекулами. Чтобы расплавить твердое тело, нужно преодолеть эту взаимную связь, совершить некоторую работу, на что нужно израсходовать определенное количество тепла. При обратном процессе (затвердевании) затраченное на плавление тепло выделяется. Так как при процессе кипения температура не изменяется (спирт же расходуется), то очевидно, что на превращение жидкости в пар также расходуется тепло. При охлаждении это тепло выделяется обратно.

Количество тепла, которое нужно затратить на превращение 1 кг твердого тела в жидкое состояние (при температуре плавления), носит название теплоты плавления.¹

Количество тепла, потребное на превращение 1 кг жидкости в пар (при температуре кипения), называется теплотой кипения.²

Теплота плавления

Лед	80	бол.	кал.
Железо	49	>	>
Олово	14,3	>	>
Сера	10,0	>	>
Свинец	5,4	>	>
Ртуть	2,8	>	>

Теплота кипения

Вода	537	больш.	кал.
Алкоголь	205	>	>
Эфир	85	>	>
Ртуть	68	>	>

Как надо понимать, что теплота плавления олова 14,3 бол. кал.? Это значит, что на плавление 1 кг олова при 232° требуется 14,3 бол. кал. Очевидно, что на плавление одной тонны олова нужно 14,3 термий, а на плавление 1 г — 14,3 мал. кал.

Решим задачу. Требуется определить, сколько нужно израсходовать тепла, чтобы 10 кг льда взятого при -30° расплавить, нагреть полученную воду до 100° и обратить ее в пар.

1. Расход тепла на подогревание льда от -30° до 0° .

Чтобы 1 кг льда нагреть на 1° , нужно затратить	0,5	бол.	кал.
10 > > > > 1° , > > > >	5	>	>
10 > > > > 30° , > > > >	150	>	>

2. Расход тепла на плавление льда.

Чтобы 1 кг льда расплавить, нужно затратить	80	бол.	кал.
10 > > > > > > > >	800	>	>

¹ Теплота плавления раньше называлась *скрытой теплотой плавления*.

² Теплота кипения раньше называлась *скрытой теплотой кипения*.

3. Расход тепла на подогревание полученной из льда воды от 0° до 100° .

Чтобы	1 кг	воды	нагреть	на	1°	нужно	затратить	1	бол.	кал.
'	10	'	'	'	1°	'	'	10	'	'
'	10	'	'	'	100°	'	'	1000	'	'

4. Расход тепла на кипение воды.

Чтобы	1 кг	воды	превратить	в пар,	нужно	затратить	537	бол.	кал.
'	10	'	'	'	'	'	5370	'	'

Итого расход тепла на все указанные процессы:

$$150 + 800 + 1000 + 5370 = 7320 \text{ бол. кал.}$$

§ 226. Дробная перегонка. Нефть представляет собою смесь целого ряда различных жидкостей — бензина, керосина, смазочных масел и т. д. Как отделить эти составные части одну от другой? Для этой

цели можно воспользоваться способностью каждой из различных жидкостей, составляющих нефть, кипеть при своей особой температуре.

В котел *A* (рис. 228) нужно налить нефть и начать ее подогревание. При некоторой определенной температуре закипит одна из составных частей нефти. Нужно поставить приемник *E*, куда будут собираться оживившиеся пары кипящей жидкости. Для лучшего оживления паров поль-

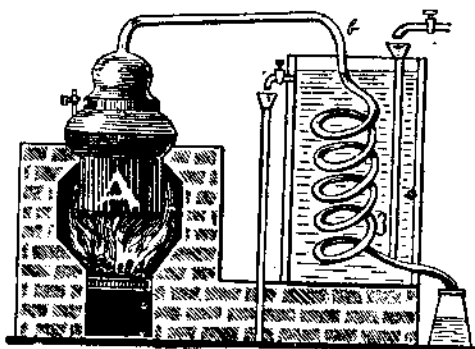


Рис. 228.

зуются змеевиком *Z*, непрерывно охлаждаемым проточной холодной водою.

Наконец кипение прекращается, ртуть в термометре поднимается вверх. Значит, вся жидкость, входившая в состав нефти и кипевшая при более низкой температуре, обратилась в пар.

Затем ртуть в термометре вновь останавливается. Начинает кипеть другая составная часть. Нужно менять приемник и собирать в него эту вторую жидкость.

Таким образом можно разделить смесь различных жидкостей на отдельные части.

Этот метод получил название *дробной перегонки*. Им постоянно пользуются химики при своих работах.

§ 227. Определение теплоты плавления льда. Обратимся еще раз к нашему графику, выражающему связь между изменением температуры и временем нагревания при процессах плавления льда, нагревания воды и т. д. (рис. 225). Чтобы подогреть некоторое количество воды от 0° до 100° , потребовалось нагревание в течение 20 минут, тогда как на плавление такого же количества льда при 0° понадобилось 16 минут. Нельзя ли, исходя из этих данных, определить теплоту плавления льда?

На подогревание воды на 100° требуется на каждый килограмм 100 больших калорий, на нагревание бывших у нас a килограммов потребовалось $100a$ больших калорий, на выделение которых было потрачено 20 минут.

Обозначим теплоту плавления льда через x больших калорий, тогда на плавление a килограммов льда нужно было xa больших калорий, на что было потрачено 16 минут.

Записываем:

На выделение $100a$ больших калорий потребно 20 минут.

» » » xa » » » 16 »

Составляем пропорцию:

$$xa : 100a = 16 : 20$$

$$x : 100 = 16 : 20;$$

откуда

$$x \cdot 20 = 100 \cdot 16,$$

или

$$x = \frac{100 \cdot 16}{20} = 80 \text{ больших калорий.}$$

Конечно этот способ расчета очень неточен, он возможен лишь для самых приближенных подсчетов.

Познакомимся теперь с другими способами определения теплоты плавления льда.

Возьмем железную гирию, нагреем ее в парах кипящей воды до 100° и поставим на большой кусок льда при 0° . Соприкасаясь с холодной поверхностью льда, гирия начнет остывать, отдавая тепло на плавление льда до тех пор, пока ее температура не сравняется с 0° (тающий лед имеет температуру 0°). Зная вес гири и вес образовавшейся под нею от таяния льда воды, легко определить теплоту плавления льда.

Пусть гирия весит 5 кг, а вес расплавленного льда равен 0,7 кг. Тепло, отданное гирею при ее остывании от 100° до 0° :

1 кг железа, остывая на	1°	отдает тепла	0,11	бол. кал.
5 » » » » »	1°	» » »	0,55	» »
5 » » » » »	100°	» » »	55	» »

Тепло, полученное льдом для плавления:

чтобы 1 кг льда расплавить, нужно	x	бол. кал.
» 0,7 » » » »	$0,7x$	» »

Пренебрегая потерями тепла вследствие лучеиспускания железной гири и т. д., можно считать, что количество тепла, отданного ею при остывании, равно количеству тепла, полученному льдом при плавлении, т. е.:

$$55 = 0,7x,$$

откуда

$$x = \frac{55}{0,7} = 80 \text{ бол. кал. (приблизительно).}$$

Более точным является способ определения теплоты плавления льда с помощью калориметра.

Берем внутренний сосуд калориметра, взвешиваем его, наливаем определенное количество теплой воды и записываем температуру. Затем берем кусочки тающего льда (следовательно при 0°), тщательно снимаем тряпочкой с их поверхности воду и опускаем один за другим в калориметр. Лед тает, температура воды и внутреннего сосуда-калориметра понижается. Записываем общую температуру.¹

Чтобы узнать вес расплавленного льда, вновь взвешиваем калориметр с водою. Прибавка в весе и покажет нам вес растаявшего льда.

Данные приводим в таблице:

	Вес (в граммах)	Темпера- тура	Тепло- емкость	Общая темпер. $T = 5^\circ$
Калориметр (латунный)	100	35°	0,093	
Вода	300	35°	1	
Лед	109,2	0°	—	

1. Тепло, отданное водою в калориметре при остывании от 35° до 5° , т. е. на 30° .

1 г воды, остывая на 1° , отдает 1 мал. кал.
 300 > > > > 1° , > 300 > >
 300 > > > > 30° , > 9000 > >

2. Тепло, отданное калориметром.

1 г латуни, остывая на 1° , отдает 0,093 мал. кал.
 100 > > > > 1° , > 9,3 > >
 100 > > > > 30° , > 279 > >

Всего вода и стенки калориметра отдали

$$9000 + 279 = 9279 \text{ мал. кал.}$$

3. Тепло, полученное льдом при плавлении.

1 г льда требует на плавление x мал. кал.
 109,2 > > > > 109,2x > >

¹ Чтобы уменьшить потери тепла вследствие лучеиспускания, рекомендуется опускать лед до тех пор, пока температура не понизится на столько же градусов ниже комнатной, на сколько градусов выше комнатной она была до начала опыта. Тогда потеря тепла в начале опыта (пока температура калориметра с водою выше комнатной) будет компенсироваться приобретением тепла от окружающего воздуха в течение периода времени, когда температура калориметра с водою ниже комнатной температуры.

4. Тепло, пошедшее на нагревание полученной из льда холодной воды при θ до общей температуры $T=5^\circ$.

1 г воды, нагреваясь на 1° , требует	1 мал. кал.
109,2 > > > > 1° , >	109,2 > >
109,2 > > > > 5° , >	546 > >

Всего лед и вода из него получили тепла $109,2x + 546$ мал. калорий.

Тепло, отданное горячей водою и калориметром при остывании, равно теплу, полученному льдом и холодной водою, образовавшейся после его плавления, т. е.

$$9279 = 109,2x + 546;$$

$$9279 - 546 = 109,2x;$$

$$x = \frac{8733}{109,2} \cong 80 \text{ мал. кал.},$$

т. е. на плавление 1 г льда требуется 80 мал. кал.

Решим ту же самую задачу, введя буквенные обозначения. Все данные приведены в таблице.

	Вес (в граммах)	Темпе- ратура	Тепло- емкость	Общая темпе- ратура
Калориметр . . .	p_1	t°	c	T°
Вода	p_2	t°	f	
Лед	p_3	0°	—	

Составляем калориметрическое уравнение:

$$\underbrace{cp_1(t-T) + p_2(t-T)}_{\text{Тепло, отданное калориметром и водою}} = \underbrace{xp_3 + p_2T}_{\text{Тепло, полученное льдом при плавлении и образовавшейся из него водою при нагревании ее до } T^\circ}$$

Решая это уравнение, находим x (теплоту плавления льда):

$$x = \frac{(cp_1 + p_2)(t-T) - p_2T}{p_3}.$$

§ 228. Определение теплоты кипения воды. Опыты, подобные уже сделанным нами, показывают, что для превращения в пар при 100° некоторого количества воды требуется времени, а следовательно и затраты тепла, приблизительно в 5—5,5 раза больше, нежели для

подогревания той же воды от 0° до 100° . Это дает возможность определить приблизительно значение теплоты парообразования воды.

Чтобы 1 кг воды нагреть на 100° , требуется 100 больших калорий; чтобы обратить его в пар (при 100°), затрачивается тепла в 5—5,5 раза больше, т. е. требуется 500—550 больших калорий.

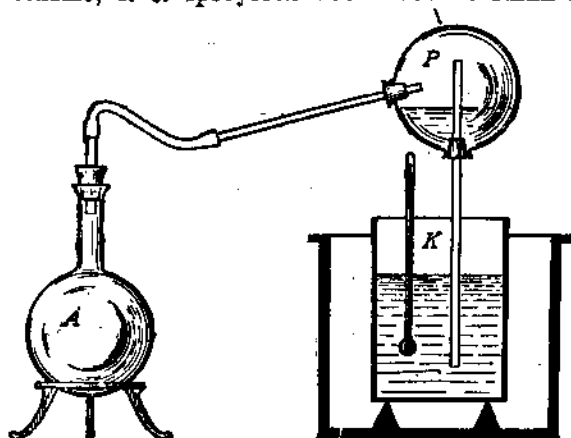


Рис. 229.

Более точный метод основан на применении калориметра.

Сначала взвешивают внутренний сосуд калориметра K , наливают туда некоторое количество воды и записывают температуру. Затем опускают в калориметр конец трубки. Через нее идут пары воды, кипящей в колбе A . Шарик P служит для задержания капелек воды, которые могли бы увлечь в калориметр пар (рис. 229).

Помещивая воду в калориметре, следят за повышением температуры. Когда она заметно поднимается, вынимают трубку и записывают установившуюся температуру.

Количество пара, обратившегося в воду, определяется новым взвешиванием калориметра с водою. Увеличение веса дает возможность судить о весе ожившегося пара.

Данные записываем в таблицу.

	p	t	c	Общ. темпер. $T = 30^{\circ}$
Калориметр . . .	220	10°	0,093	
Вода	500	10°	1	
Водяной пар ..	17,1	100°	—	

Подсчитываем сначала количество тепла, полученного водою в калориметре при нагревании от 10° до 30° .

Чтобы	1 г	воды нагреть на	1°	нужно затратить	1 мал. кал.
»	500 »	»	» 1°	»	500 »
»	500 »	»	» 20°	»	10 000 »

Тепло, пошедшее на нагревание сосуда:

1 г	латуни для нагревания на	1°	требует	0,093 мал. кал.
220 »	»	» 1°	»	20,46 »
220 »	»	» 20°	»	409,2 »

Всего калориметр с водою получили тепла:

$$10\,000 + 409,2 \cong 10\,410 \text{ мал. кал.}$$

Такое же количество тепла, т. е. 10 410 малых калорий, отдал пар при 1) обращении в воду и 2) при охлаждении 17,1 г воды, полученной из пара, от 100° до общей температуры 30°.

Тепло, отданное паром при ожижении:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ г пара, ожижаясь, дает} & x \text{ мал. кал.} \\ 17,1 > > > > 17,1 x > > \end{array}$$

Тепло, отданное полученной из пара водою при охлаждении ее от 100° до общей температуры 30°:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ г воды, охлаждаясь на } 1^\circ, \text{ отдает} & 1 \text{ мал. кал.} \\ 17,1 > > > > 1^\circ, > 17,1 > > \\ 17,1 > > > > 70^\circ, > 1197 > > \end{array}$$

Всего паром и полученной из него водою отдано:

$$17,1 x + 1197 \text{ мал. кал.}$$

Очевидно,

$$17,1 x + 1197 = 10\,410,$$

откуда:

$$x = \frac{9213}{17,1} \cong 537 \text{ мал. кал.}$$

Решим ту же задачу, вводя буквенные обозначения. Все данные приводим в таблице.

	Вес (в граммах)	Темпе- ратура	Тепло- емкость	общая темпе- ратура
Калориметр . . .	p_1	t_1°	c	T°
Вода . . . , . . .	p_2	t_1°	1	
Водяной пар . .	p_3	t_2°	—	

Составляем калориметрическое уравнение:

$$\underbrace{cp_1(T - t_1) + p_2(T - t_1)}_{\text{тепло, полученное калори-}} = \underbrace{xp_3 + p_2(t_2 - T)}_{\text{тепло, отданное па-}}.$$

метром и водою

ром при конденса-
ции в полученной
из него водою при
охлаждении ее до
общей температуры.

Решая это калориметрическое уравнение, находим теплоту кипения воды (x):

$$x = \frac{(cp_1 + p_2)(T - t_1) - p_2(t_2 - T)}{p_3}.$$

§ 230. Влияние давления на температуру кипения. Заставляя кипеть воду у подножия горы и на ее вершине, мы замечаем, что она кипит при различных температурах. Чем выше гора, тем меньше давление воздуха и тем ниже оказывается температура кипения воды и всех других жидкостей. Так, на Монблане (высота 4,8 км) вода кипит при 84° . Наоборот, спускаясь на дно глубокой шахты, где больше атмосферное давление, мы отметили бы повышение точки кипения воды.

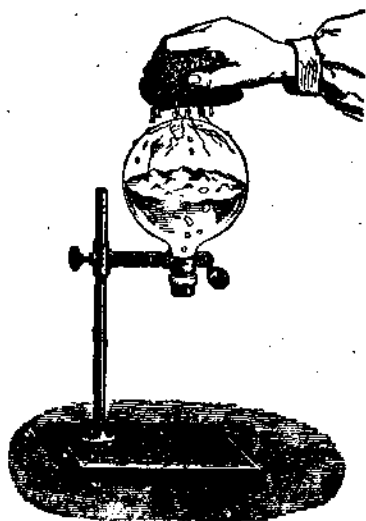


Рис. 230.

Прodelайте такой опыт. В стеклянной колбе начните кипятить воду; когда пары вытеснят из нее весь воздух, плотно закройте пробкой и прекратите нагревание — кипение тотчас же прекратится. Переверните колбу дном вверх. Приложив теперь к колбе мокрую тряпку (рис. 230), вы заметите, как вода снова начнет кипеть. Касаясь охлажденных мокрой тряпкой стенок колбы, водяные пары будут ожиматься, внутри колбы давление их на поверхность воды уменьшится, и она снова закипит.

Ниже мы помещаем табличку, в которой указана связь между давлением и температурой кипения.

Давление в атмосферах (округлено)

Температура кипения воды.

1	100°
0,47	80°
0,31	70°
0,20	60°
0,12	50°
0,07	40°
0,042	30°
0,023	20°
0,012	10°
0,006	0°

Если поместить под колокол воздушного насоса сосуд с водою, взятой при комнатной температуре, и достаточно разредить воздух, можно добиться того, что вода закипит.

При кипении воды под колоколом воздушного насоса происходит ее охлаждение. Почему? На этот вопрос, вероятно, не затруднится ответить наш читатель. На обращение воды в пар расходуется тепло. Это тепло вода не получает извне и берет его от самой себя, вследствие чего температура воды постепенно понижается. Заставляя воду кипеть под колоколом воздушного насоса, можно обратить ее в лед.

Постоянно происходящие колебания атмосферного давления заметно

оказываются на температуре кипения воды. Сегодня она кипит при $99,93^\circ$, завтра при $99,96^\circ$ и т. д.

При работе по теплоте нам приходилось нагревать тела в парах кипящей воды, пропускать пары в калориметр и различными другими способами пользоваться водяным паром. Во всех случаях мы считали, что температура кипения воды 100° . Это, конечно, не точно. Правильнее было бы измерить атмосферное давление в данный момент и по таблицам определить соответствующую температуру кипения воды.

Ниже мы приводим такую таблицу.

ТЕМПЕРАТУРА КИПЕНИЯ ВОДЫ T° ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ H мм.

(По наблюдениям Реньо).

H	T	H	T	H	T
мм	$^\circ$	мм	$^\circ$	мм	$^\circ$
720	98,50	740	99,26	760	100,00
721	98,54	741	99,30	761	100,04
722	98,57	742	99,33	762	100,07
723	98,61	743	99,37	763	100,11
724	98,65	744	99,41	764	100,15
725	98,69	745	99,44	765	100,18
726	98,73	746	99,48	766	100,22
727	98,77	747	99,52	767	100,26
728	98,80	748	99,56	768	100,29
729	98,84	749	99,59	769	100,33
730	98,88	750	99,63	770	100,36
731	98,92	751	99,67	771	100,40
732	98,95	752	99,71	772	100,44
733	98,99	753	99,74	773	100,47
734	99,03	754	99,78	774	100,51
735	99,07	755	99,82	775	100,55
736	99,11	756	99,85	776	100,58
737	99,14	757	99,89	777	100,62
738	99,18	758	99,93	778	100,65
739	99,22	759	99,96	779	100,69
740	99,26	760	100,00	780	100,73

Как показывает опыт, температура кипения не только воды, но и всех вообще тел *повышается с увеличением давления и, наоборот, понижается с уменьшением давления.*

В паровом котле, где давление пара на поверхность воды измеряется несколькими атмосферами, температура кипения воды, конечно, выше нормальной.

Так, под давлением	2 атмосфер	вода кипит при	121°
» » »	3 » » »	» » »	134°
» » »	4 » » »	» » »	144°
» » »	5 » » »	» » »	152°
» » »	6 » » »	» » »	159°
» » »	7 » » »	» » »	165°
» » »	8 » » »	» » »	171°
» » »	9 » » »	» » »	176°
» » »	10 » » »	» » »	180°
» » »	20 » » »	» » »	218°

§ 230. Полная теплота пара. Полной теплотой водяного пара (λ) называется все количество тепла, которое нужно затратить, чтобы одну весовую единицу воды нагреть от 0° до температуры кипения, соответствующей данному давлению, и для превращения ее при данной температуре в насыщенный пар.

Обозначим тепло, пошедшее на нагревание воды через q , а тепло, пошедшее на превращение воды в пар, через r , тогда

$$\lambda = q + r.$$

Тепло, пошедшее на превращение воды в пар, т. е. теплота кипения, может быть вычислено по формуле Реньо,¹

$$r = 606,5 - 0,695 t.$$

где t — температура кипения.

Так, например, для точки кипения $t = 100^\circ$ мы получим теплоту кипения

$$r = 606,5 - 0,695 \cdot 100 = 537 \text{ кал.}$$

Действительно, мы знаем, что для обращения 1 кг воды в пар при кипении при нормальном атмосферном давлении требуется затратить 537 бол. кал.

Для определения всей теплоты пара Реньо дает формулу:

$$\lambda = 606,5 + 0,305 t.$$

Рассчитаем, сколько калорий нужно затратить, чтобы из 1 кг воды, взятой при 20°, получить 1 кг насыщенного пара под давлением в 10 атмосфер.

Из таблицы на этой странице мы находим, что под давлением 10 атмосфер вода кипит при 180°, следовательно $t = 180^\circ$.

В таком случае

$$\lambda = 606,5 + 0,305 \cdot 180 = 661,4 \text{ бол. кал.}$$

Но для нагревания 1 кг воды от 0° до 20° уже было израсходовано 20 бол. кал. Таким образом искомая затрата тепла выразится в

$$661,4 - 20 = 641,4 \text{ бол. кал.}$$

§ 231. Влияние давления на температуру плавления тел. Точка плавления тел также зависит от того давления, под которым находится тело. Чем больше давление, тем выше температура плавления тела. Однако небольшие изменения атмосферного давления, которые постоянно происходят, не сказываются заметным образом на температуре плавления тел. Чтобы повысить, например, температуру плавления воска на 1°, нужно увеличить давление почти на 50 атмосфер.

¹ Это тепло расходуется: 1) на самый процесс преодоления взаимной связи между молекулами, на их разъединение, и 2) на увеличение удельного объема, так как пар занимает больший объем, чем такое же весовое количество жидкости; при расширении пара ему приходится преодолевать внешнее давление, для чего требуется совершить некоторую работу. В формуле Реньо r выражает сумму обоих этих расходов.

Некоторые тела представляют исключение. При увеличении давления они плавятся, наоборот, при более низкой температуре. Таковы *лед, чугун, висмут, сурьма*. При увеличении давления на одну атмосферу точка плавления льда понижается, например, на $0,0075^{\circ}$.

Со льдом часто проделывают такой опыт. Через кусок льда, положенный на две опоры (см. рис. 231), перекидывают проволочную петлю, к концу которой подвешивают тяжелый груз. Проволока производит давление на лед, и он под ней начинает плавиться (с увеличением давления температура плавления льда понижается). Вода, образовавшаяся после таяния льда, вновь замерзает, и проволока, пройдя через весь кусок льда, оставляет его целым, а не разрезанным на две отдельные части.

§ 232. Изменение объема тел при плавлении. *Все тела в момент плавления увеличиваются в объеме*. Так, например, медь в жидком состоянии при температуре 1083° занимает объем больший, чем еще твердая медь при той же температуре. Исключение из этого правила составляют *лед, чугун, висмут и сурьма*.

Эта способность указанных тел уменьшать свой объем при плавлении объясняет нам, почему все они с увеличением давления плавятся при более низкой температуре. Работа по обращению тела в жидкое состояние состоит из двух частей: 1) работа, идущая на разъединение молекул, 2) работа на увеличение объема. Так как перечисленные выше тела уменьшают свой объем при плавлении, то возрастание давления только способствует их обращению в жидкое состояние, так как работа плавления будет совершаться отчасти внешними силами, и этот переход может происходить при более низкой температуре.

§ 233. Сплавы. Сплавы металлов имеют одну очень интересную особенность. Их точка плавления иногда резко отличается от температуры плавления входящих в их состав металлов.

Ниже приведены рецепты изготовления наиболее распространенных легкоплавких сплавов.

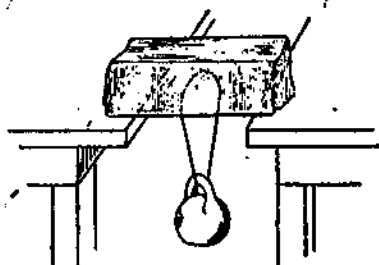


Рис. 231.

С п л а в ы		Сплав Резе	Сплав Дарсе	Сплав Вуда
Составные части	Точка плавления			
Олово	232°	27,34%	15,5%	14,8%
Висмут	272°	48,66%	52,5%	52,2%
Кадмий	321°	—	—	7,0%
Свинец	330°	24,00%	32,0%	26,0%
Точка плавления сплава		$96,8^{\circ}$	$96,2^{\circ}$	$63,5^{\circ}$

Некоторые сплавы отличаются исключительной прочностью. Таков, например, *дуралюминий* (сплав алюминия с марганцем и др. металлами); при легкости в 2½ раза большей, чем у стали, он обладает равной с ней прочностью. Кроме того он не покрывается, подобно железу, ржавчиной. Вот почему современные аэронавы и дирижабли очень часто делаются из дуралюминия.

§ 234. Температура кипения и затвердевания растворов. Как показывает опыт, температура кипения растворов всегда выше температуры кипения чистого растворителя.

Сделайте такой опыт. Налейте в колбу воды и растворите в ней некоторое количество поваренной соли. Начните подогревать воду и следите по термометру за повышением температуры.

Если во время производства опыта было нормальное атмосферное давление, то чистая вода должна кипеть при 100°. Однако вы заметите, что *раствор закипит при более высокой температуре*.

Во время кипения все большее и большее количество воды будет обращаться в пар, вследствие чего концентрация раствора станет увеличиваться, а термометр будет отмечать постепенное повышение температуры кипения. Наконец, получится насыщенный раствор, и избыток нерастворенной соли начнет откладываться на дне колбы. Термометр в это время покажет 108,4°. Итак, насыщенный раствор поваренной соли кипит при 108,4°.

Насыщенный раствор соды кипит при 104,6°, селитры при 115,9°.

Температура затвердевания растворов ниже точки затвердевания чистого растворителя. Чем больше в данном количестве жидкости растворено некоторого вещества, тем более заметно понижение температуры затвердевания. Насыщенный раствор поваренной соли замерзает при — 22°. Морская вода, содержащая большое количество растворенных веществ, замерзает всегда при температуре ниже 0°.

§ 235. Теплота растворения. Начните растворять в воде какую-нибудь соль, предварительно погрузив в воду термометр. Вы заметите понижение температуры.

Подобно тому как на плавление тел расходуется тепло, так и на растворение расходуется тепло.

При растворении твердое тело распадается на отдельные молекулы, которые распределяются по всему растворителю. Конечно, на этот процесс расходуется тепло.

То количество тепла, которое расходуется на растворение в воде 1 кг данного вещества, называется *теплотой растворения*.

Вот примеры *теплоты растворения*:

Вещества	Теплота растворения
Поваренная соль	22
Нашатырь	73
Калиевая селитра	82

При растворении некоторых веществ замечается, наоборот, выделение тепла. Так, при соединении с водой едкого кали происходит заметное повышение температуры. Если в крепкую серную кислоту понемногу наливать воду, то вода нагревается, и температура поднимается иногда даже до 100°. Негашенная известь выделяет тепло при соединении с водой и т. д.

Во всех приведенных выше примерах появление тепла является результатом *гидратации*, т. е. соединения воды с растворяющимися в ней веществом. На самый же процесс растворения, т. е. разъединения молекул растворенного вещества, расходуется, тепло; но этот расход тепла меньше выделения тепла, происходящего при гидратации.

Приготовление *охлаждающих смесей* основано на свойстве тел расходовать тепло на плавление и растворение.

Наиболее распространенной охлаждающей смесью является смесь из одной части поваренной соли и трех частей снега. Тепло расходуется на плавление льда и растворение соли, и в результате температура понижается. Образовавшийся раствор соли остается жидким, так как его точка затвердевания ниже 0°. Этой охлаждающей смесью можно понизить температуру до — 21°. Ею часто пользуются при изготовлении мороженого.

Еще большее охлаждение дает смесь роданистого калия или хлористого кальция со снегом. Последняя дает возможность понизить температуру до -55° .

§ 286. Вопросы и задачи. А. Для очищения воды от находящихся в ней растворенных веществ пользуются перегонкой (рис. 228). В котле А (его называют перегонным кубом) кипятят воду, образующиеся при этом пары по трубке В переходят в холодильник З, представляющий собой спирально изогнутую трубку (змеевик), окруженную холодной водой. Соприкасаясь с холодными стенками трубы З, пары обращаются в воду, которую собирают в сосуд Е. Полученная в сосуде Е вода будет совершенно чистой, без всяких примесей, так как все бывшие в растворе вещества остаются в перегонном кубе.

Предположим, в топке сжигаются березовые дрова, требуется узнать, какое количество нужно их израсходовать, чтобы обратить в пар 500 кг воды, взятой при 10° , если коэффициент полезного действия установки 60%.

1. Расход тепла на подогревание 500 кг воды на 90° (от 10° до 100°):

Чтобы нагреть	1 кг воды на	1° , требуется	1 бол. кал.
»	» 500 »	» » 1° , »	500 »
»	» 500 »	» » 90° , »	45 000 »

2. Расход тепла на обращение воды в пар:

Чтобы обратить в пар	1 кг воды, требуется	537 бол. кал.
» » » 500 »	» » »	268 500 »

3. Общий расход тепла:

$$45\,000 + 268\,500 = 313\,500 \text{ бол. кал.}$$

4. При сгорании 1 кг березовых дров выделяется 3150 бол. кал., но лишь 60% т. е.

$$\frac{3150 \cdot 60}{100} = 1\,890 \text{ бол. кал.}$$

идет на полезное нагревание и парообразование воды, остальные же 40% идут на подогревание стенок куба, точки, теряются лучеиспусканием, уходят в воздух с горячими продуктами горения.

5. Так как всего требуется 313 500 бол. кал., а с каждого килограмма сгоревших дров полезно расходуется 1 890 бол. кал., то общее количество дров, необходимых для парообразования 500 кг воды, будет равно

$$\frac{313\,500}{1\,890} \approx 170 \text{ кг.}$$

Б. Вместо того чтобы зимою со дворов и улиц вывозить снег, в городах часто пользуются *снеготопками*. Под большим металлическим ящиком разводится огонь, часть тепла, выделяющегося при сгорании топлива, идет на плавление снега, помещенного в этом ящике. Требуется вычислить, какое количество сосновых дров нужно израсходовать, чтобы обратить в воду 10 т снега и льда при температуре -10° , если коэффициент полезного действия снеготопки равен 40%.

1. Расход тепла на подогревание льда и снега до температуры плавления:

Чтобы	1 кг льда нагреть на	1° , нужно затратить	0,5 бол. кал.
» 10 000 »	» » 1° , »	»	5 000 »
» 10 000 »	» » 10° , »	»	50 000 »

(или 50 термий).

2. Расход тепла на плавление льда:

Чтобы	1 кг льда расплавить, требуется	80 бол. кал.
» 10 000 »	» » »	800 000 »

(или 800 термий).

3. Всего требуется тепла:

$$50\,000 + 800\,000 = 850\,000 \text{ бол. кал.}$$

4. При сгорании 1 кг сосновых дров полезно расходуется

$$\frac{3200 \cdot 40}{100} = 1280 \text{ бол. кал.}$$

5. Расход дров равен

$$\frac{850\,000}{1280} = \text{около } 664 \text{ кг.}$$

340. Почему бутылка, наполненная доверху водою и плотно закрытая пробкой, лопается, будучи выставлена на мороз?

341. Почему чугун при отливке из него различных предметов очень хорошо передает все подробности той формы, в которую его отливают?

342. Почему вода, попадая в трещины камней, разрушает их при наступлении морозов?

343. Можно ли измерить атмосферное давление, имея в своем распоряжении чувствительный термометр с делениями на доли градуса и сосуд с водою?

344. Какое количество тепла нужно израсходовать, чтобы 5 кг льда, взятого при -10° , нагреть до 0° , расплавить, полученную воду нагреть до 100° и половину ее обратить в пар?

345. Если указанные выше процессы производить на примусе, обладающем коэффициентом полезного действия 40% , то какое количество керосина с теплоемкостью 10 300 бол. кал. нужно израсходовать для этой цели.

346. 3 кг льда, взятого при -10° , нагреванием превратили в воду, которую нагрели до 25° . Сколько тепла было израсходовано при этом?

347. Для получения воды при $t = 100^\circ$ путем плавления льда, взятого при -10° было затрачено 92,5 бол. калорий. Определить количество полученной воды.

348. Сколько нужно затратить тепла, чтобы 10 кг свинца, взятого при 30° , нагреть до точки плавления и расплавить?

349. Расплавленный свинец при 330° льется струями в воду. Определить, какая будет после этого температура 10 л воды взятой при 30° . Свинца было 20 кг.

350. В железном сосуде весом 200 г находится 500 г воды, в которой плавает кусок льда весом 125 г. Температура воды, калориметра и льда 0° . Какое количество водяного пара при 100° нужно пустить в воду, чтобы расплавить лед и поднять общую температуру до 40° ? Теплоемкость железа 0,11.

351. В железном сосуде весом 150 г находится 2 кг ртути. Температура ртути в сосуде 20° . В сосуд вливается 500 г расплавленного свинца, находящегося при 330° . Найти общую температуру.

352. В чашке содержится 500 г льда. Что будет находиться в чашке после того, как в нее влили 100 г воды, нагретой до 80°C , если температура окружающей среды равна 0° .

353. В медном сосуде весом 100 г находится 500 г воды при температуре 40° . В воду опущен кусок льда весом 75 г, взятого при -10° . Найти общую температуру.

354. При какой температуре находилась вода, взятая в количестве 2 кг, если после опускания в нее 5 $^\circ \text{C}$ льда при -10° установилась общая температура $+16^\circ$.

355. Определить температуру, которая установится после смешения пара с водою в сосуде.

Данные приведены в таблице:

	Вес (в граммах)	Темпера- тура	Тепло- емкость	Общая темпера- тура = x
Сосуд (медный) . .	200	10°	0,095	
Вода	300	10°	1	
Водяной пар . . .	20	100°	—	

356. Определить количество воды, смешанной с паром. Данные приведены в таблице:

	Вес (в граммах)	Темпера- туры	Тепло- емкость	Общая температура = 30°
Сосуд (стекля- ный)	80	20°	0,19	
Вода	x	20°	1	
Водяной пар . . .	10	100°	—	

357. Какое количество снега при температуре 0° растает под колесами автомобиля, если он буксует в течение 0,5 мин. Мощность автомобиля 28 HP, а на буксовку уходит 50% всей мощности?

358. Сколько тепла нужно израсходовать для превращения в пар при 357° 20 кг ртути, взятой при 17°?

359. Сколько тепла нужно израсходовать для плавления при 330° 2 т свинца взятого при 30°?

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ.

ПАРЫ.

§ 237. Насыщенные пары. Прежде чем перейти к описанию тепловых двигателей, познакомимся вкратце со свойствами паров.

Рис. 232 изображает прибор, состоящий из двух барометрических трубок *A* и *B*, погруженных в чашку с ртутью. С помощью пипетки с загнутым концом будем вводить под отверстие одной из трубок капельки воды — они станут всплывать на поверхность ртути; попадая в безвоздушное пространство, капли воды обратятся в пар, давление на поверхность ртути увеличится и ее уровень понизится. Наконец, в некоторый момент мы заметим, что дальнейшее испарение воды внутри трубки прекратилось, это значит, что пар насытил пространство.

Таким образом, следует различать пары *ненасыщенные* (если в пространстве, занятом парами некоторой жидкости, ее дальнейшее испарение возможно) и *насыщенные* (если жидкость больше не испаряется).

Упругость тех и других измеряется соответственным понижением уровня ртути в барометрической трубке. Если уровень ртути в трубке, где находятся пары, понизился на 15 мм по сравнению с другой трубкой, в которой над поверхностью ртути пустота, то говорят, что пар имеет упругость в 15 мм.

Как показывает опыт, *упругость насыщенных паров при данной температуре для каждой жидкости есть вполне определенная величина.*

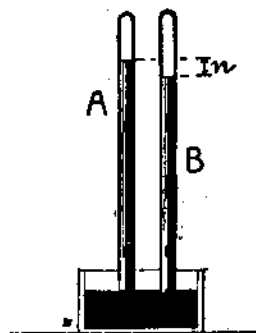


Рис. 232.

Окружая трубки *A* и *B* (рис. 233) стеклянным цилиндром *D* и наливая в него воду, легко проследить за изменением упругости водяных паров (или какой-нибудь жидкости) при различных температурах. Подогревая снизу сосуд с ртутью и помешивая воду в цилиндре мешалкой *m*, мы отмечаем по термометру *K* температуру нагрева и записываем соответствующее давление насыщенных паров.

Вот данные об упругости насыщенных водяных паров при разных температурах:

Температура	Упругость насыщенных паров	
	в мм ртутного столба	в атмосферах
0°	4,6	0,006
10°	9,2	0,012
20°	17,4	0,023
30°	31,7	0,042
40°	55,0	0,07
60°	149	0,20
80°	355	0,47
100°	760	1

Итак, насыщенные водяные пары при 100° имеют упругость, равную 760 мм ртутного столба, т. е. одной атмосфере, но ведь при давлении в одну атмосферу вода кипит при 100°.

При 40° упругость насыщенных водяных паров 55 мм, или 0,07 атмосферы, а при давлении 0,07 атмосферы вода кипит при 40°.

Таким образом, мы приходим к выводу, что *температура кипения воды (или другой жидкости) при данном давлении равна той температуре, при которой ее насыщенные пары имеют такую же упругость.*

Пример. При каком давлении закипит вода при 60°? Опыт показывает, что насыщенные пары воды имеют при 60° упругость в 0,2 атмосферы. Очевидно, вода закипит при 60°, если давление на нее сделается равным 0,2 атмосферы.

Чем отличается испарение от кипения? Испарение происходит только с поверхности жидкости, кипение же — во всей массе жидкости. Испарение может быть при всякой температуре, кипение — только при определенной. Пусть внутри жидкости образовался пузырь пара. Он находится под давлением атмосферы и слоев жидкости над ним. Чтобы он не был раздавлен этим давлением, упругость насыщенного пара внутри него должна быть не меньше наружного атмосферного да-

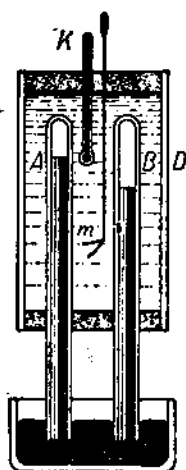


Рис. 233.

вления. Отсюда легко прийти к выводу, что *жидкость закипит тогда, когда давление на нее сделается равным упругости ее насыщенных паров.*

Для определения давления насыщенных паров воды при температуре выше 100° обычно пользуются толстостенным металлическим котлом (рис. 234), в крышке которого делается отверстие, прикрытое предохранительным клапаном *K*. Клапан прижимается к отверстию с

помощью груза P , привешенного на конце рычага. Предположим, наибольшее допустимое в котле давление равно 4 атмосферам, тогда груз P должен быть рассчитан таким образом, чтобы его давление на клапан K было немного менее 4 атмосфер. Как только упругость пара делается больше давления груза, клапан приподнимется и часть пара прольется наружу.

С помощью термометра T судят о температуре внутри котла. Манометр M показывает давление пара в котле.

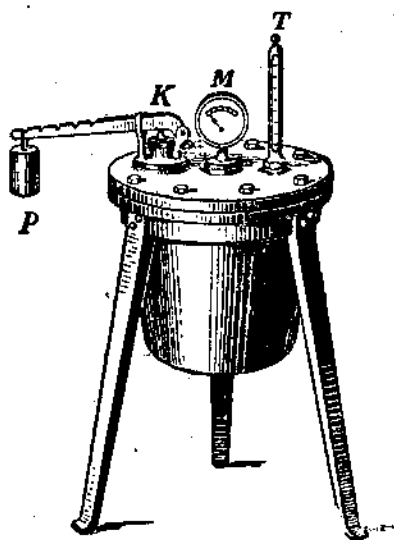


Рис 234.

Сравните эту таблицу с таблицей, помещенной на стр. 216. Не подметите ли вы чего-либо общего между ними?

§ 238. Закон Дальтона. Начните впускать в барометрическую трубку, изображенную на рис. 232, по капельке воду, испарение будет происходить мгновенно. Пусть температура 20° — при этой температуре насыщенные водяные пары имеют упругость 17,5 мм, т. е. уровень ртути в трубке под их давлением понижается на 17,5 мм. Но ведь эту упругость имеют насыщенные водяные пары в пустоте, такую ли упругость будут они иметь, распространяясь в каком-нибудь газе или другом паре?

Введем в трубку некоторое количество сухого воздуха, впуская затем в пространство, занятое им, опять по капельке воду; мы заметим, что она будет испаряться не мгновенно, а постепенно; когда же получится насыщенный пар, то его давление понизит уровень ртути еще на 17,5 мм. Если бы мы впускали воду в пространство, занятое другим газом, то водяные пары к уже имеющемуся давлению еще добавили 17,5 мм, т. е. упругость насыщенного пара в воздухе или ином каком-нибудь газе при данной температуре та же, что и в пустоте (конечно, если пар не действует на газ химически). Это положение было впервые установлено знаменитым английским физиком Дальтоном и носит название закона Дальтона.

§ 239. Ненасыщенные пары. Ненасыщенные пары, как показывает опыт, подчиняются законам Бойля-Мариотта и Гэ-Люссака. Поднимая барометрическую трубку, мы будем увеличивать объем, занимаемый паром, упругость его при этом будет уменьшаться: при возрастании объема вдвое упругость делается в два раза меньше и т. д.

При нагревании ненасыщенные пары расширяются подобно газам, следуя закону Гэ-Люссака.

Если же мы будем менять объем насыщенного пара, то упругость его не изменится при этом: в случае сжатия избыток пара обратится в жидкое состояние, наоборот, при увеличении объема часть жидкости еще испарится; если же в пространстве, где находится пар, нет более этой жидкости, то он делается ненасыщенным. При охлаждении насыщенного пара часть его выделяется в жидком виде, при нагревании же испаряется еще некоторое количество жидкости (или пар обращается в ненасыщенный).

§ 240. Влажность и ее определение. В воздухе всегда находятся водяные пары. Нас интересует вопрос, насколько влажен воздух в данном помещении. Чтобы ответить на него, воспользуемся свойством некоторых веществ поглощать из воздуха водяные пары.

Эти вещества называют *гигроскопическими*. К ним относятся: серная кислота, хлористый кальций, негашенная известь и т. д.

Наполнив несколько U-образных трубок хлористым кальцием, соединяют их с сосудом с водою (рис. 235). Этот сосуд носит название аспиратора и снабжается краном в нижней своей части. Если открыть кран, вода из аспиратора будет вытекать, а на ее место будет входить наружный воздух. Прежде чем поступить в аспиратор, он пройдет через трубки с хлористым кальцием и

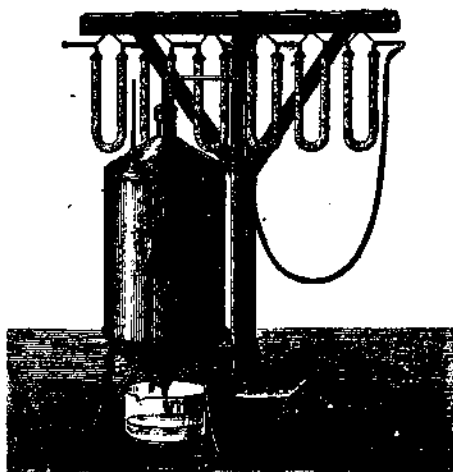


Рис. 235.

отдаст этому веществу все содержащиеся в нем водяные пары. Ввесим трубки с хлористым кальцием до и после пропускания через них воздуха. Пусть второе взвешивание обнаружало прибавку веса в 3,2 г.

Если аспиратор вмещает 50 л воды, а за время опыта его наполняли водою и вновь опорожняли 5 раз, то, очевидно, через трубки прошло $50 \times 5 = 250$ л, т. е. $\frac{1}{4}$ м³ воздуха.

Если в $\frac{1}{4}$ м³ воздуха содержится 3,2 г водяных паров, то в 1 м³ их заключается $3,2 \times 4 = 12,8$ г.

Число граммов водяного пара, заключающегося в одном кубическом метре воздуха, называется *абсолютной влажностью*.

Следовательно, абсолютная влажность воздуха в помещении, где мы производили опыт, равна 12,8 г.

Можем ли мы теперь ответить на вопрос: сырой воздух в нашем помещении или сухой? Конечно, нет. Необходимо еще знать, какое количество водяных паров нужно для полного насыщения 1 м³ воздуха при данной температуре.

Отношение количества водяных паров, находящихся в 1 м³

воздуха, к количеству, потребному для полного насыщения его, носит название относительной влажности. Только она дает возможность судить о сырости или сухости воздуха в данном помещении.

Ниже мы приводим таблицу, в которой указано количество водяных паров, потребных для полного насыщения 1 м³ воздуха при разных температурах, и их упругость.

Упругость F водяного пара (в мм ртутного столба) и вес e водяного пара в г/м³, если пар насыщен при температуре t° .

t	F	e	t	F	e
	мм	г		мм	г
— 10°	2,2	2,4	10°	9,1	9,3
— 9	2,3	2,5	11	9,8	10,0
— 8	2,5	2,7	12	10,4	10,6
— 7	2,7	2,9	13	11,1	11,2
— 6	2,9	3,1	14	11,9	12,0
— 5	3,2	3,4	15	12,7	12,8
— 4	3,4	3,7	16	13,5	13,5
— 3	3,7	4,0	17	14,4	14,4
— 2	3,9	4,2	18	15,3	15,2
— 1	4,2	4,5	19	16,3	16,2
0	4,6	4,9	20	17,4	17,2
1	4,9	5,2	21	18,5	18,2
2	5,3	5,6	22	19,6	19,2
3	5,7	6,0	23	20,9	20,4
4	6,1	6,4	24	22,2	21,6
5	6,5	6,8	25	23,5	22,8
6	7,0	7,3	26	25,0	24,2
7	7,5	7,8	27	26,5	25,6
8	8,0	8,2	28	28,1	27,0
9	8,5	8,7	29	29,7	28,5
10	9,1	9,3	30	31,5	30,1

Комнатная температура того помещения, где мы производили определение влажности, 20°. Количество паров, заключенных в 1 м³, составляло 12,8 г; количество паров, нужных для полного насыщения, находим из таблицы, — оно равно 17,2 г.

Таким образом, относительная влажность определится так:

$$\frac{12,8}{17,2} = 0,74.$$

Итак, в воздухе исследованного нами помещения находятся водяные пары в количестве 0,74, или 74% от количества, необходимого для полного насыщения.

Для комнатного воздуха относительная влажность обычно колеблется в пределах от 50% до 80%. При влажности свыше 80% воздух следует считать сырм.

Решим задачу. В подвале, где температура воздуха 5°, абсолютная влажность равна 6 г, в комнате при температуре 14° абсолютная влажность 8,5 г. Где воздух сырее?

Для подвала относительная влажность $\frac{6}{6,8} \cdot 100 = 88\%$.

Для комнаты относительная влажность $\frac{8,5}{12,0} \cdot 100 = 70\%$.

Хотя абсолютная влажность больше у воздуха в комнате, но воздух в подвале следует считать сырее.

§ 241. Роса. Жаркий летний день. Температура воздуха 25°, абсолютная влажность 11,4 г. Насыщен ли воздух водяными парами? Конечно, нет. Для насыщения нужно, чтобы в каждом кубическом метре воздуха было 22,8 г, а имеется всего лишь 11,4 г, т. е. $\frac{11,4}{22,8} \cdot 100 = 50\%$.

Наступает вечер, а затем ночь. Температура постепенно понижается. Вот, наконец, 13¼°. При этой температуре водяные пары уже насыщают пространство, а избыток их при дальнейшем охлаждении воздуха выделяется в виде росы.

Если мы заметим ту температуру, при которой начинает появляться роса (так называемую *точку росы*), то мы можем определить влажность воздуха. Предположим, роса появилась при 10°. Это значит, что в воздухе имеется такое количество водяных паров, которое при 10° насыщает пространство. Из таблицы следует, что оно равно 9,3 г.

§ 242. Гигрометры. Приборы, с помощью которых определяется влажность воздуха, носят название *гигрометров*. Уже описанный нами гигрометр, основанный на свойствах гигроскопических веществ поглощать влагу, называется *химическим*.

Ознакомимся теперь с гигрометрами, в которых улавливают точку росы. На рис. 236 изображен простейший гигрометр этого типа.

В металлический стаканчик *A* наливают эфир: продувая через трубку *a* воздух, ускоряют его испарение. В результате быстрого испарения эфира температура его и стенок стаканчика понижается, что отмечается с помощью термометра *t*. В некоторый момент на наружной полированной поверхности стаканчика появляется налет влаги (роса). Заметив эту температуру, мы узнаем по таблице количество паров, находящихся в воздухе.

В лабораториях очень часто пользуются гигрометром Даниэля (см. рис. 237). Он состоит из двух шариков *A* и *B*, соединенных между собой трубкой. В шарике

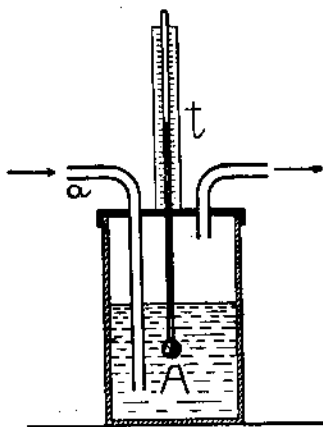


Рис. 236.

А находится эфир. Воздух удален из прибора и все свободное от эфира пространство заполнено его парами.

Окружают шарик В тряпочкой и обливают ее эфиром. Эфир быстро испаряется и отнимает тепло от шарика. Находящиеся внутри его пары эфира обращаются в жидкость. Это понижает давление паров и увеличивает испарение эфира из шарика А.

Соприкасаясь с холодными стенками шарика В, пары эфира вновь охлаждаются, это вызывает новое испарение эфира из шарика А и т. д.

В результате непрерывного испарения эфира из шарика А его температура понижается. Наконец, в некоторый момент на блестящей позолоченной части поверхности этого шарика появляется роса. Температура появления росы находится по термометру внутри прибора. Температура окружающего воздуха может быть определена с помощью термометра на стойке.

§ 243. Гигроскоп Соссюра. Если с поверхности человеческого волоса удалить жир, то волос приобретает способность заметно укорачиваться, находясь в сухом пространстве, и удлиняться в присутствии влаги.

Этим свойством человеческого волоса пользуются для устройства *гигроскопов*, т. е. приборов, дающих возможность очень грубо и приблизительно судить о влажности воздуха.



Рис. 238.

Рисунок 238 изображает гигроскоп Соссюра. В верхней части рамки закреплен человеческий волос, другой конец волоса накручен на валик, вращающийся вокруг оси, и натянут с помощью гирьки. К вороту прикреплена стрелка, указывающая на деления на шкале.

Сначала гигроскоп помещается в пространство, лишенное водяных паров. Там, где останавливается стрелка, ставят 0%. Затем помещают его в пары кипящей воды и новое положение стрелки отмечают 100%. Пространство между 0% и 100% делят на 100 равных частей, или же наносят промежуточные деления, пользуясь указаниями более точных гигрометров.

§ 244. Водяные пары в атмосфере. Начните кипятить воду в каком-нибудь стеклянном сосуде, например в стеклянной колбе. Как только начнется кипение, вы заметите над горлышком колбы белую струйку, которую вы назовете «паром».

Однако, над поверхностью воды в колбе вы не замечаете никаких паров, а между тем они, конечно, заполняют всю колбу. Чем это объясняется?

Дело в том, что *водяные пары совершенно прозрачны и незаметны для глаза*. Их присутствие мы не можем определить внутри колбы, хотя она вся заполнена паром.

Выходя из горлышка колбы, водяные пары соприкасаются с наружным воздухом и превращаются в воду, образуя мельчайшие капельки ее в виде *водяного тумана*. Этот туман обычно ошибочно и называют паром.

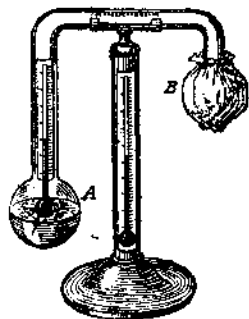


Рис. 237.

Откройте зимою окно на улицу. Вам будет казаться, что в окно врывается струя пара. На самом деле в окно входит холодный воздух. Соприкасаясь с ним, водяные пары переходят в насыщенное состояние и избыток влаги выделяют в виде мельчайших капелек, образующих туман.

Над поверхностью земли воздух обычно бывает не насыщен водяными парами. Поднимаясь вверх, пары попадают в более холодные слои воздуха, насыщают пространство, часть паров переходит в жидкое состояние, образуя мельчайшие капельки. Таким образом возникают облака, из которых вода низвергается на землю в виде дождя, града или снега.

§ 245. Сжижение газов. Что нужно сделать для обращения газа в жидкое состояние? Вспомнив то обстоятельство, что частицы газов находятся в быстром движении и почти не связаны друг с другом,

тогда как в жидкостях силы сцепления играют уже весьма важную роль, мы легко ответим на предложенный вопрос.

Необходимо увеличить взаимную связь между частицами. Для этой цели следует, во-первых, сблизить газовые частицы между собою, что может быть достигнуто увеличением давления, а во-вторых, необходимо охладить газ, чтобы уменьшить скорость движения частиц, а следовательно, и их стремление отрываться друг от друга.

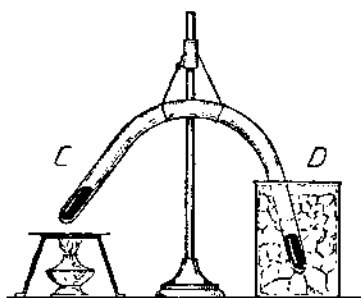


Рис. 239.

Великий английский физик Фарадей один из первых обратил в жидкое состояние целый ряд газов (хлор, углекислый газ, аммиак, сероводород, сернистый газ, циан и др.). Прибор, которым он пользовался, изображен на рис. 239. Он представляет собой изогнутую запаянную трубку из толстого стекла, в одном колене *C* помещается вещество, которое выделяет при нагревании требуемый газ, другое же колено *D* погружено в охлаждающую смесь (например, смесь снега с солью). В трубке постепенно собирается все больше и больше газа, следовательно, давление в ней возрастает. Газ переходит в жидкое состояние и собирается в части трубки, погруженной в охлаждающую смесь.

В дальнейшем Фарадей пользовался давлением до 50 атмосфер и понижением температуры до -110° , что достигалось быстрым испарением под колоколом воздушного насоса смеси эфира с твердой углекислотой. Таким образом, он обратил в жидкое состояние почти все известные в то время (1845 г.) газы, за исключением кислорода, водорода, азота, окиси углерода, окиси азота и метана — эти газы получили тогда название *постоянных*.

§ 246. Критическая температура. Причина неудач попыток Фарадея и других физиков обратить постоянные газы в жидкость заключалась в том, что они не умели получить достаточно низкую температуру.

Если мы будем нагревать в запаянной трубке воду, то при темпе-

ратуре 365° она мгновенно обратится в пар. При этой температуре скорость движения молекул воды столь велика, что силы сцепления, существующие между ними, не в состоянии сохранить взаимную связь молекул, и они делается такими же свободными, как у газов. Если бы мы вздумали обратить в жидкое состояние водные пары, имеющие температуру выше $+365^{\circ}$, то никаким давлением не смогли бы достичь этого. *Та температура, при которой утрачивается связь между частицами жидкости и она обращается в газ, носит название температуры абсолютного кипения, или критической температуры.*

Вот критические температуры для некоторых тел:

Гелий	-268°	Углекислый газ	$+ 31^{\circ}$
Водород	-240°	Эфир	$+ 194^{\circ}$
Азот	-146°	Алкоголь	$+ 243^{\circ}$
Кислород	-118°	Вода	$+ 365^{\circ}$

Так как критическая температура кипения водорода -240° , то лишь при охлаждении его ниже этой температуры возможно обращение его в жидкое состояние; при температурах же выше критической никаким давлением его нельзя обратить в жидкость.

Какая же разница между газом и паром? Пар, нагретый выше критической температуры, носит название газа.

Водяной пар при температурах выше $+365^{\circ}$ становится газом. Наоборот, газ, охлажденный ниже критической температуры, становится паром.

Кислород при температуре ниже -118° можно назвать паром.

§ 247. Нагревание газов при сжатии и охлаждение при расширении. Сжимая газ, мы совершаем при этом работу. Затраченная

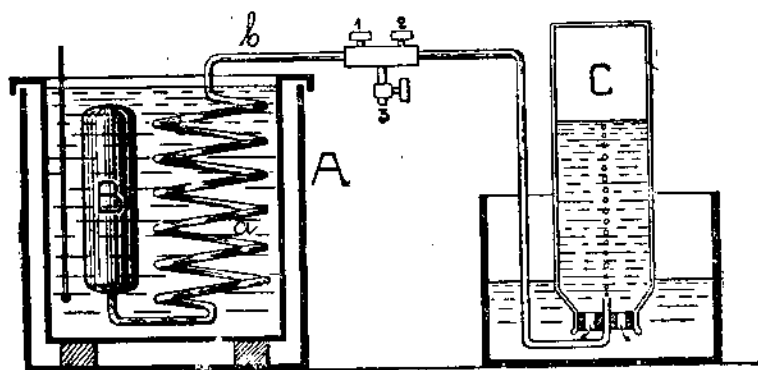


Рис. 240.

нами энергия переходит в тепловую — газ нагревается. Наоборот, сжатый газ, расширяясь, совершает работу (поднимая, например, поршень с грузом), при этом температура его понижается.

Указанным свойством газов можно воспользоваться для определения механического эквивалента теплоты. Для этой цели Джоуль брал сосуд с водою *A*, в котором помещался цилиндр *B*, соединенный изогнутой трубкой *b* с воздушным насосом (рис. 240). Накачивая через кран 3 воздух в этот цилиндр (кран 1 открыт, кран 2 закрыт), Джоуль отмечал повышение температуры в результате сжатия в нем воздуха. Он подсчитал совершенную при накачивании воздуха работу и количество выделенного тепла, что привело его к выводу, что одной большой калории соответствует работа 424 *кал*, т. е. тот же результат, который он получил совсем другим путем.

Затем Джоуль открывал кран 2 и выпускал струю сжатого воздуха из цилиндра в банку *C*, предварительно наполненную водою (кран 3 был при этом закрыт). Сжатый воздух расширялся и вытеснял воздух из банки. Не трудно было подсчитать величину работы, совершаемой воздухом. Расширение воздуха сопровождалось охлаждением, количество потерянной теплоты, в свою очередь, легко могло быть учтено. И в этом случае оказалось, что воздух, теряя 1 большую калорию тепла, совершал 424 *кал* работы.

§ 248. Прибор Линде. Английские физики Джоуль и Томсон (лорд Кельвин) произвели в середине прошлого столетия чрезвычайно ценные исследования прохождения газов сквозь пористые тела и установили степень охлаждения их (газов) при переходе в область меньшей упругости.

Пользуясь их работами, немецкий профессор Линде построил прибор для обращения газов в жидкое состояние, т. е. основанный на охлаждении газов при переходе из-под большого давления в малое (рис. 241).

По трубке *a* атмосферный воздух всасывается в цилиндр компрессора *b* и сжимается там до 16 атмосфер, затем он переходит во второй цилиндр *d*, где сжимается до 200 атмосфер. Конечно, при сжатии воздух нагревается. Для охлаждения его пропускают через змеевик, окружающий компрессоры. Вокруг змеевика непрерывно циркулирует проточная вода. Она отнимает тепло также и от стенок цилиндра.

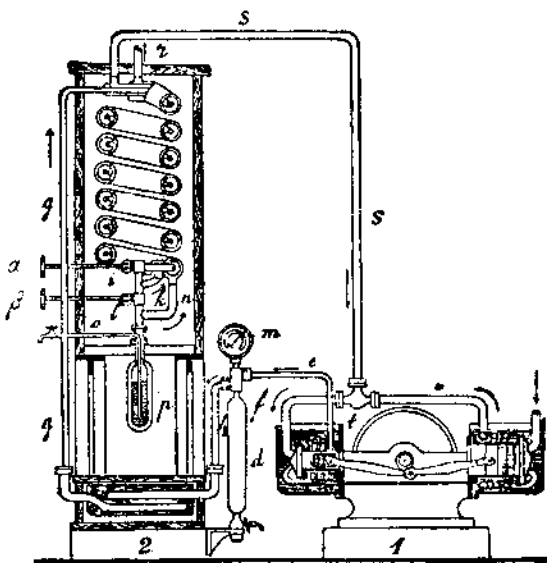


Рис. 241.

Затем сжатый воздух поступает в сосуд *j*, где осаждается содержащаяся в нем вода, далее он входит в холодильник, где находится охлаждающая смесь, еще понижающая его температуру.

Из холодильника воздух поступает по трубке *g* во внутреннюю трубку большого медного змеевика (он изображен в разрезе в виде трех вложенных одна в другую и изогнутых спиралью трубок). С помощью крана *a* устанавливается сообщение внутренней трубки со средней. При переходе в более широкую трубку

воздух расширяется, давление падает с 200 до 16 атмосфер и температура его понижается градусов на 50.¹

Охлажденный воздух поднимается по II трубке, охлаждая сжатый воздух, идущий по I трубке (I трубка находится внутри II), и поступает затем снова в цилиндр и т. д.

Продолжая несколько раз описанный процесс, охлаждают воздух до температуры близкой к той, при которой происходит сжижение (примерно — 180°). Затем открывают кран β, воздух из II трубки переходит в III (наружную), соединенную с внешним воздухом, и давление падает до атмосферного.

При этом новом расширении воздух столь сильно охлаждается, что обращается в жидкое состояние и собирается в приемнике p, часть его, не успевшая обратиться в жидкость, уходит в атмосферу через трубку r.

§ 249. Свойства жидкого воздуха. Полученный из прибора Линде жидкий воздух обычно бывает мутен, так как содержит мелкие кристаллики твердой углекислоты и различные другие примеси. При пропускании его через фильтр получают совершенно прозрачную серо-голубоватую жидкость, имеющую температуру — 193°.

Его сохраняют в сосудах Дьюара, где его можно продержать несколько дней. Ни в коем случае нельзя плотно закрывать сосуд Дьюара, так как испаряющийся воздух легко может разорвать сосуд.

Жидкий воздух, имея весьма низкую температуру, замораживает почти все жидкости. Опуская в сосуд с жидким воздухом стаканчик с ртутью, получают ее в твердом виде.

Курное яйцо, апельсин, опущенные в жидкий воздух, делаются твердыми и чрезвычайно хрупкими. Если замороженный таким образом апельсин уронить на пол, он разлетится на тысячи кусков. Резиновый мячик, облитый жидким воздухом, теряет свою эластичность и от удара молотка разбивается, как стеклянный.

Спираль свинцовой проволоки, опущенная в жидкий воздух, приобретает упругость стальной. Если ее растянуть и опустить, она пружинит и вновь возвращается к прежнему виду.

§ 250. Холодильники. Искусственный лед. Для хранения скоропортящихся продуктов пользуются холодильниками. В больших городах имеются специальные здания-холодильники, с целым рядом отдельных камер для различных продуктов, в которых поддерживается температура, наиболее пригодная для их хранения.

В камерах температура поддерживается постоянной при помощи системы труб, по которым проходит раствор хлористого аммония, хлористого кальция или иной охлаждающий раствор. Иногда охлаждение камер достигается при помощи льда.

Для перевозки скоропортящихся продуктов служат *изотермические вагоны* (ледники), снабженные изолирующими стенками. Охлаждение производится при помощи льда.

Искусственный лед получил широкое применение за последнее время не только для зданий-холодильников и вагонов-ледников, но и для хранения продуктов в домашнем обиходе. Для получения искусственного льда обычно пользуются ледоделательными машинами, работающими при помощи аммиака.

На рис. 242 изображена такая машина. В цилиндре A взад и вперед ходит поршень. При опускании поршня открывается левый клапан (правый клапан закрыт) и в цилиндр входит газообразный аммиак. При поднятии поршня последний аммиак сильно сжимается, левый клапан закрывается, правый открывается и аммиак входит в змеевик B, охлаждаемый холодной водой. Вследствие сжатия и охлаждения аммиак сжимается, выделяющееся при этом тепло уносится омывающей змеевик водой. Жидкий аммиак проходит через клапан D с узким отверстием и, попадая в ряд широких труб C, сразу понижает давление, расширяется и вновь обращается в газообразное состояние. На испарение аммиака и его расширение

¹ Для воздуха, например, это охлаждение Δ, выраженное в градусах, может быть представлено такой формулой:

$$\Delta = 0,276(P_1 - P_2) \left(\frac{273}{273 + t} \right)^2,$$

где P_2 — упругость той среды, куда входит воздух, P_1 — первоначальная упругость воздуха и t — его температура (до впуска).

расходуется тепло, вследствие чего температура насыщенного раствора соли, окружающего трубы С, понижается. Соленая вода не замерзает при этом, так как точка ее замерзания ниже температуры затвердевания чистой воды. Охлажденный соляной раствор замораживает пресную воду в сосудах J. Когда образуется лед, их вынимают и помещают другие сосуды. Газообразный аммиак из труб С идет вновь в цилиндр А.

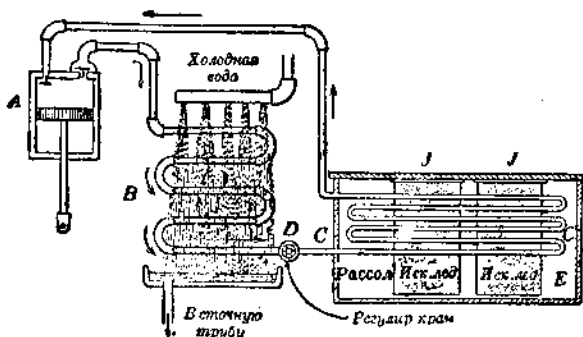


Рис. 242.

их вынимают и помещают другие сосуды. Газообразный аммиак из труб С идет вновь в цилиндр А.

§ 251. Вопросы и задачи. 360. Для чего между оконными рамами помещают стаканчик с серной кислотой?

361. Почему зимою обращенная в комнату сторона внутренней оконной рамы запотевает и с нее течет вода, наружная же рама замерзает?

362. Почему зимою заметно выделение пара (вернее водяного тумана) при дыхании, летом же его присутствие не заметно?

363. Почему после жаркого летнего дня вечером замечается образование тумана?

364. Температура воздуха в комнате 15° . Точка росы, определенная с помощью гигрометра, 8° . Какова абсолютная и относительная влажность?

365. Какое количество тепла нужно израсходовать, чтобы 50 кг воды, взятой при 15° , обратить в насыщенный пар под давлением 8 атмосфер?

366. 10 кг насыщенного пара, находящегося в паровом котле под давлением 4 атмосфер, обращаются в воду, которая охлаждается до 20° . Какое количество тепла выделяется при этом?

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ.

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ.

§ 252. Принцип действия паровой машины. Вам, конечно, приходилось видеть паровую машину, и вы сможете указать, из каких главных частей она состоит. Прежде всего должен быть *паровой котел*, в котором вода нагревается и обращается в пар. Так как упругость насыщенных водяных паров тем больше, чем выше их температура, а вода в котле нагревается всегда свыше, чем до 100° , то и насыщенные водяные пары имеют упругость более 1 атмосферы.

Из котла пар по особой трубе-паропроводу поступает в цилиндр, в котором может двигаться взад и вперед поршень. Обладающий упругостью более 1 атмосферы пар стремится расшириться, производит давление и толкает поршень. Цилиндр машины снабжается парораспределительным механизмом, благодаря которому пар автоматически выпускается то с одной, то с другой стороны поршня, и поршень совершает движение взад и вперед; отработанный пар с обратной стороны при этом выпускается из цилиндра. Движение поршня посредством штока и шатуна приводит во вращение вал машины.

При расширении пара в цилиндре он охлаждается, так как часть заключенной в нем энергии совершает механическую работу.

§ 253. Перегрев пара. Непосредственное применение насыщенного пара из котла для работы машины имеет ряд недостатков. Образуюсь в котле, он механически захватывает с собой частицы воды, в которой могут содержаться различные примеси. Даже и самая лучшая изоляция трубопровода не защищает пар от некоторого охлаждения; при этом выделяются, во-первых, капельки воды, механически захваченные паром, а, во-вторых, вода, в которую часть его конденсируется. Таким образом, часть пара, уже обращенная в трубопроводе в воду, теряется для рабочего процесса. При расширении пара в цилиндре также конденсируется значительная часть пара. Образовавшаяся вода является вредным балластом и часто служит причиной неправильной работы машины. Соли, содержащиеся в увлеченной паром воде, осаждаются на стенках паропровода и цилиндра и загрязняют их.

Чтобы избежать неудобств, которые влекут за собою пользование насыщенным паром, широко применяют *перегревание пара*. Пар из котла поступает в перегреватель, обычно представляющий собой змеевик из железных труб, помещенный в одном из дымоходов котла. Там пар нагревается до 300° — 350° и уже при такой температуре пускается через трубопровод в машину. Многочисленные опыты показали, что пользование перегретым паром дает значительную экономию в топливе, а следовательно работа машины обходится дешевле.

§ 254. Конденсация пара. Предположим, что пар поступает в цилиндр, обладая упругостью в 3 атмосферы, в то же время отработанный пар с обратной стороны поршня выпускается в воздух, при этом он производит давление на поршень с противоположной стороны с силой, равной 1 атмосфере. Таким образом, давление, совершающее работу в том случае, когда отработанный пар выпускается в воздух, равно давлению пара на поршень минус атмосферное давление.

Как же поступить, чтобы уменьшить это противодействие отработанного пара, ослабляющее полезное давление? Нужно выпускать отработанный пар не непосредственно в воздух, а в особый охлаждаемый водою змеевик, где пар конденсируется; при этом происходит уменьшение его давления. Например, если в холодильнике температура воды 20° , то поступающий туда пар охлаждается до указанной температуры, большая часть его обращается при этом в воду, давление же оставшейся части будет равно упругости насыщенных паров при 20° , т. е. всего только 17,4 мм. Таким образом, *конденсация пара увеличивает полезную работу машины*.

§ 255. Расчет топлива. В топке парового котла сгорело в час 50 кг каменного угля теплотворной способностью 7000 бол. кал. Требуется узнать, какую мощность может развить машина.

При сгорании 1 кг каменного угля выделяется 7000 бол. кал.
 „ „ 50 „ „ „ 350 000 „ „

Так как одна большая калория соответствует механической работе в 427 кг.м, то 350 000 бол. кал. дадут работу:

$$350\,000 \times 427 \text{ кг.м.}$$

Работа, совершенная в секунду, будет в $60 \times 60 = 3600$ раз меньше, т. е.

$$\frac{350\,000 \times 427}{3\,600} \text{ кгм}$$

или

$$\frac{350\,000 \times 437}{3600 \times 75} = \text{около } 560 \text{ л. с.}$$

Определим теперь действительную мощность нашей машины. Для этой цели можно воспользоваться *нажимом Прони* (рис. 243), состоящим из двух деревянных колодок *A* и *B*, стянутых вместе болтами *n* и *m* и прижатых к рабочему шкиву или валу машины *D*. К длинному плечу нижней колодки подвешивается груз *p*, который можно передвигать по длине этого плеча. Затягивая болты *n* и *m*, добиваются того, чтобы вал *D* вращался с той скоростью, которую он имеет при полной нагрузке машины, груз *p* при этом передвигают вдоль плеча *s* до тех пор, пока оно не примет горизонтального положения. Вращающийся вал стремится повернуть прижатые к нему колодки в направлении, указанном стрелкой, груз *p* стремится произвести вращение в обратном направлении. Момент, стремящийся повернуть колодки *A* и *B* вместе с валом, равен $F \cdot r$, где F — сила трения, увлекающая колодки в направлении, указанном стрелкой, а r — радиус вала (в метрах).

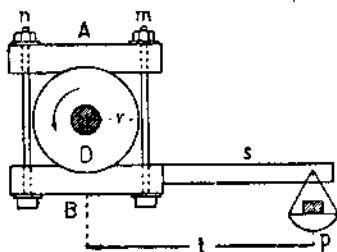


Рис. 243.

В том случае, когда машина совершает какую-нибудь полезную работу, ее вал *D* вращается с той же скоростью, как и в нашем случае, а следовательно и такой же силой F .

Вращающий момент силы p равен $p \cdot l$, где l — расстояние груза p от оси вращения (в метрах).

В случае равновесия плеча s

$$Fr = pl,$$

откуда

$$F = \frac{pl}{r}.$$

Если машина дает N оборотов в секунду, то путь, проходимый в секунду точкой приложения силы F , равен L :

$$L = N \cdot 2\pi r,$$

а вся работа силы F в секунду, т. е. мощность машины W :

$$W = F \cdot L = \frac{pl}{r} N 2\pi r = 2\pi l N p \text{ кгм/сек.}$$

или, в лошадиных силах:

$$W = \frac{2\pi l \cdot N \cdot p}{75} \text{ л. с.}$$

Пусть подобные измерения дают для нашей машины 67 л. с. Итак, вместо 560 л. с., которые мы ожидали получить от машины, мы имеем всего 67 л. с., т. е. $\frac{67}{560} = \text{около } 0,12$, или 12%.

Отношение фактически полученной энергии на валу машины к затраченной носит название *общего коэффициента полезного действия*.

§ 256. Потери энергии топлива в паровой машине. Из всей энергии, выделенной топливом при сгорании, лишь 12% передалось рабочему валу, где же остальные 88%?

Вот кочегар бросил в топку кусок каменного угля, при сгорании которого выделилось 100 бол. кал.; проследим внимательно за их судьбой. Через решетку в поддувало провалились мелкие кусочки раскаленного угля, они бесполезно унесли с собой некоторое количество тепла, также немного тепла пошло на нагревание золы, всегда образующейся при сжигании угля. Будем считать, что на все эти потери из наших 100 бол. кал. израсходовалась 1 бол. кал. Если уголь плохого качества, то содержание в нем золы может достигать 20% (в лучших углях золы всего лишь 2%), и бесполезная потеря тепла, уносимого золою, может быть значительно больше 1%; кроме того, если уголь очень мелок, потеря тепла с несгоревшими кусочками также возрастет.

Горячие продукты горения отдают большую часть тепла на нагревание котла, однако они уходят в трубу тоже нагретыми (с температурой до 200°) и бесполезно уносят также известную часть тепла. Будем считать, что в нашем случае горячие газы из каждой сотни калорий уносят с собою 16 калорий. Эта потеря может быть однако значительно больше указанной, что обычно происходит в том случае, если в топку поступает или недостаточное количество воздуха, или, наоборот, избыток его.

Рассмотрим первый случай, когда в топку поступает недостаточное количество воздуха. При этом происходит неполное сгорание углерода, и вместо углекислого газа (CO_2) образуется окись углерода (CO). При образовании окиси углерода выделяется количество тепла значительно меньше того, какое бывает при полном сгорании углерода.

В случае значительного недостатка кислорода воздуха иногда со струей горячих газов выбрасывается из трубы совершенно не сгоревший углерод в виде сажки. Таким образом, когда из трубы выходят густые клубы черного дыма, то это значит, что происходит неполное сгорание, и значительная часть углерода пропадает совершенно без пользы для дела.

Предположим теперь, что в топку нагнетается избыток воздуха. Чем это плохо? Ведь горение происходит полное?

Избыток воздуха, не участвующий в горении, требует тепла для своего нагревания; кроме того, при слишком сильной тяге горячие продукты горения чересчур быстро проходят мимо котла и не успевают отдать ему свое тепло, унося большую его часть в трубу.

Чтобы сэкономить хотя бы отчасти тепло, бесполезно уносимое горячими газами, последнее время на многих заводах стали устанавливать в дымоходе батарею труб, называемую *экономайзером*, через

которые проходит вода, прежде чем поступить для питания котла. Экономайзер: 1) увеличивает коэффициент полезного действия котла, так как частично использует тепло, уносимое продуктами сгорания, 2) улучшает работу котла, так как туда поступает не холодная, а предварительно нагретая вода.

Итак, необходимо, чтобы воздуха поступало в топку именно такое количество, которое нужно для полного сгорания топлива, в противном случае потери будут превосходить те 16%, которые мы приняли для нашего случая.

Из 100 калорий котлом с водой получено $100 - 1 - 16 = 83$ калорий.

Поверхность котла, будучи нагрета до сравнительно высокой температуры, излучает в окружающий воздух тепло, которое также теряется бесполезно; будем считать, что для нашего случая эта потеря составит



Рис. 244.

12 бол. кал. Следовательно, пар уносит с собою из котла всего лишь $83 - 12 = 71$ бол. кал.

По пути в цилиндр машины пар следует по железной трубе. Несмотря на покрытие трубы изолирующими материалами, небольшая потеря тепла вследствие отдачи его железными стенками окружающему воздуху все же имеет

место. Будем считать, что в нашем случае эта потеря равна 1 бол. кал. При длинном трубопроводе и плохой изолировке эта потеря может быть значительно больше.

На рис. 244 указаны потери тепловой энергии в паровом котле.

В цилиндре паровой машины теряется 5, а иногда и больше процентов тепла на преодоление трения, охлаждение в цилиндре и т. д., процента 2 теряется вследствие трения частей машины.

Отработанный пар уносит с собою в холодильник значительную часть тепла (процесс конденсации пара сопровождается отдачей тепла — избавиться этой потери невозможно).

Пусть в нашем случае потеря в холодильнике равна 53 бол. кал. (53%) и, следовательно, на полезную работу остается всего лишь

$$71 - (1 + 5 + 53) = 12 \text{ бол. кал.}$$

§ 257. Паровой котел. Паровые котлы в зависимости от давления пара в них разделяются: на 1) котлы низкого давления, 2) котлы среднего давления, 3) котлы высокого давления.

В котлах первой категории давление пара обычно не превосходит 1,5 атмосферы, в котлах второй категории — 4 атмосферы. Оба эти типа котлов применяются почти исключительно при центральном паровом или водяном отоплении, в банях и т. д. Для паровых машин

пользуются чаще всего котлами высокого давления (от 4 и более атмосфер), как наиболее экономичными.¹

В зависимости от устройства топки различают: 1) котлы с *наружной топкой*, 2) котлы с *внутренней топкой* и 3) *трубчатые котлы*.

Наш рисунок 245 изображает идею устройства котла первого типа. Он состоит из цилиндра *a*, склепанного из толстых железных листов, способного выдержать соответствующее давление пара. Топка помещается под котлом в его передней части. Дверца *N* служит для за-расыпания топлива на чугунную решетку *e*, называемую *колосниковой решеткой*. Под решеткой расположен зольник *i* откуда через

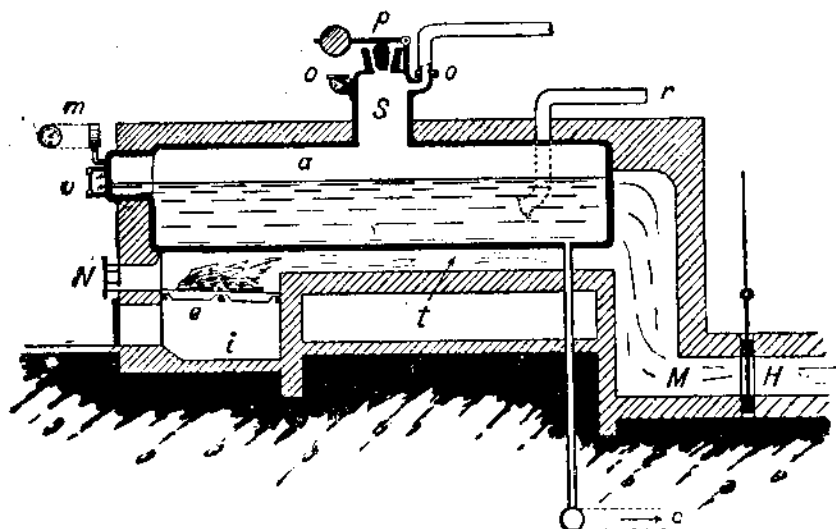


Рис. 245.

тверстия в решетке поступает воздух, необходимый для горения топлива. Из зольника же удаляются зола и мелко угли, провалившиеся через решетку. Горячие продукты сгорания идут по дымоходу, расположенному под котлом, в канал *M* и далее в наружную трубу. С помощью заслонки *H* можно больше или меньше открывать отверстие в канале *M* и таким образом регулировать тягу воздуха.

Часть поверхности котла, соприкасающаяся с горячими газами, носит название *поверхности нагрева*. Легко сообразить, что чем больше эта поверхность, тем больше паров может образоваться от одного и того же количества топлива.

Поверхность нагрева изображенного на нашем рисунке котла (с наружной топкой) очень мала. Горячие газы, проходя под котлом

¹ Наиболее существенной потерей тепловой энергии является потеря в холодильнике. Она не зависит от температуры в котле. Очевидно, пар в котле с большим давлением, имеющий сравнительно высокую температуру, теряет в холодильнике меньший процент своей тепловой энергии, чем пар из котла низкого давления.

короткое время, отдают ему сравнительно малое количество тепла и уходят наружу очень горячими. Таким образом, котлы с наружной топкой мало экономичны.

Значительно более экономичными являются котлы с внутренней топкой. Наши рисунки 246 и 247 изображают продольный и попереч-

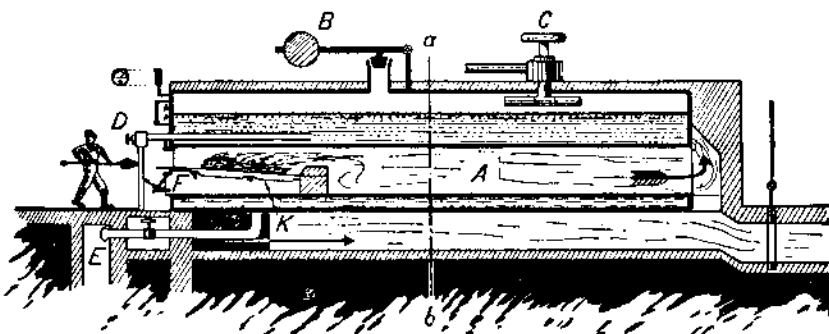


Рис. 246. Продольный разрез корнваллийского котла.

A — жаровая труба; B — предохранительный клапан; C — труба, подающая пар; D — питательная труба; E — сливная труба; K — колосники.

ный разрез одного из распространенных котлов этого рода, а именно корнваллийского котла. Он состоит из двух цилиндров — в наружном находится вода, во внутреннем (он отмечен цифрой I на рис. 247) помещается топка. Горячие продукты горения идут по этому цилиндру, затем возвращаются обратно по дымоходам II и III, расположенным по бокам котла, и переходят в канал IV, ведущий их под котлом в наружную трубу. Таким образом, горячие газы несколько раз обходят стенки котла и уходят в наружную трубу, отдав котлу большую часть своего тепла.

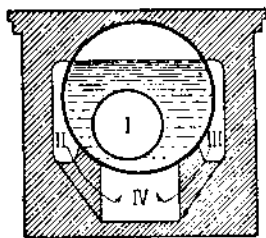


Рис. 247. Поперечный разрез корнваллийского котла.

Однако наиболее экономичными являются *трубчатые котлы*. Они бывают двоякого рода — *водотрубные* и *огнетрубные*. Последние часто именуют *дымогарными*. В водотрубных котлах, как показывает само название, вода помещается в трубах, между которыми идут из топки горячие газы. Их применяют главным образом на заводах. В огнетрубных котлах вода заполняет промежутки между трубами, по которым направляются горячие газы.

Такие котлы вы встретите на подвижных машинах — паровозах, локомотивах и пароходах.

Поверхность нагрева трубчатых котлов велика, вследствие чего вода в них нагревается очень быстро и образует пар значительно скорее, чем в котлах другого устройства.

Из водотрубных котлов, получивших в последнее время наибольшее распространение, мы укажем на известный котел системы Бабкока и Вилькокса.

Расположение труб и движение горячих продуктов горения легко видно из рис. 248.

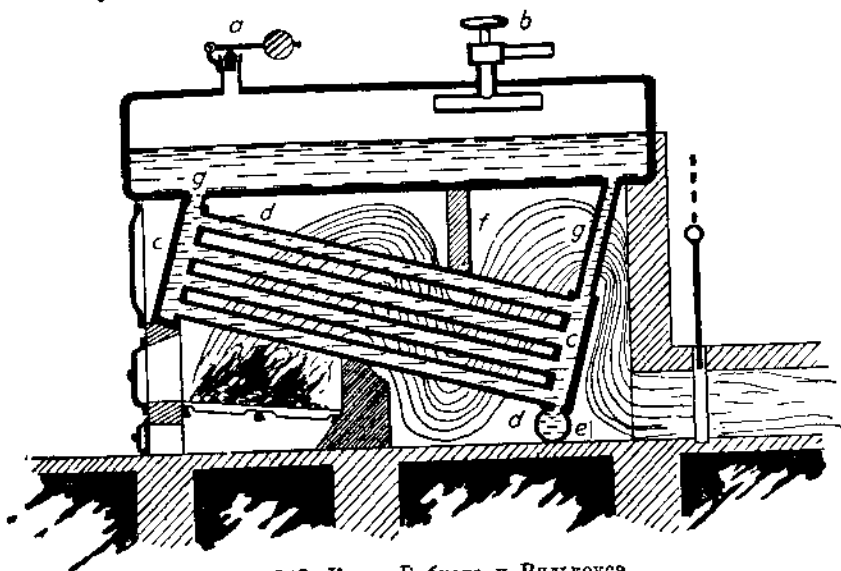


Рис. 248. Котел Бабкока и Вилькокса.

a — предохранительный клапан; *b* — труба, полаяющая пар в машину; *c, e* — чугунные коробки, соединяющие ряды труб *d* — для увеличения поверхности нагрева; *f* — грязевик для осаживания грязи; *g, g* — перегородки, направляющие движение горячих газов; *g, g* — патрубки, соединяющие котел с батареями труб.

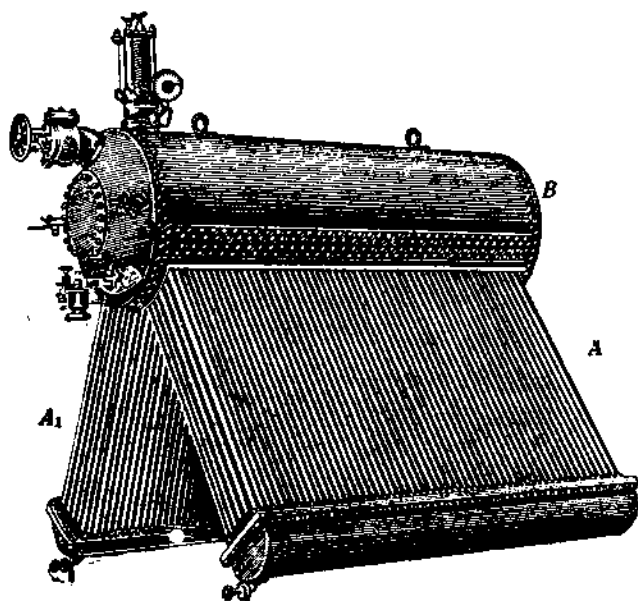


Рис. 249.

Рис. 249 изображает котел Ярроу. Образование пара происходит в батареях трубок A и A_1 . Парособирателем служит цилиндр B . Колосниковая решетка располагается между батареями A и A_1 . Котлы Ярроу особенно часто встречаются на крупных океанских пароходах.

Давление пара в огнетрубных котлах обычно не превышает 15 атмосфер, водотрубные же котлы строятся для давлений до 25 атмосфер.

При применении жидкого топлива, например, нефти, его вводят в топку с помощью особых распылителей, называемых *форсунками*.

Форсунка состоит из тонкой трубки, по которой движется воздух, сжатый до 2—3 атмосфер. При вытекании из трубки нефть увлекается сжатым воздухом, смешивается с ним и обращается в пылеобразное состояние. В таком виде нефть горит ярким пламенем. Пламя горячей нефти поднимает температуру в топке почти до 2000° .

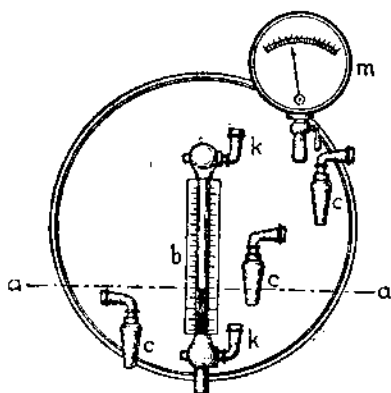


Рис. 250. Арматура котла.

a, a_1 — уровень воды; b — водомерное стекло, k, k_1 — краны, запираемые при поломке стекла, c, c_1 — пробные краны на случай поломки стекла, m — манометр.

Согласно существующим законам об уходе за паровыми котлами требуется, чтобы уровень воды в котле был на 10 см выше так называемой *огневой линии*, т. е. того уровня, до которого происходит соприкосновение наружной поверхности котла с горячими газами. Несоблюдение этого правила может повлечь за собой даже разрыв котла. Кроме водомерных трубок, располагаются еще на разной высоте *пробные краны* (рис. 250), открывая которые, смотря по тому, вырывается из них вода или пар, можно приблизительно судить об уровне воды в котле.

3. Предохранительным клапаном (p). Об его устройстве говорилось выше.

4. Питательным прибором (r) для впуска в котел воды.

5. Сухопарником (S), представляющим собой колпак в верхней части котла, от которого идет трубопровод к паровой машине.

Пар, взятый из сухопарника, содержит меньше механически захваченных частиц воды, т. е., как гов. рят, «суше».

При перегреве пара можно обойтись без сухопарника.

6. Краном для выпуска пара (o) в случае, если давление слишком велико.

§ 258. Арматура котла. Паровой котел обязательно снабжается следующими приборами (рис. 245):

1. Манометром (m) для измерения давления пара. Обычно стрелка манометра показывает не абсолютное давление, а разность давлений в котле и наружного воздуха. Если манометр отмечает 7 атмосфер, то это значит, что давление в котле на 7 атмосфер больше, чем наружного воздуха, и равно, следовательно, 8 атмосферам.

2. Водомерными трубками (v) для наблюдения над уровнем воды в котле.

§ 259. **Ижектор.** Для питания парового котла водою пользуются ижектором.

Он состоит (см. рис. 251) из трех сопел: парового (№ 1), водяного (№ 2) и приемного (№ 3). Пар поступает по трубе *A*, проходит через сопло № 1 и в камере смешения *C* смешивается с водою, подаваемой по трубе *B*. Вследствие конденсации пара в камере *C* образуется разреженное пространство, что и заставляет воду подниматься по трубе *B*; смешиваясь с водою, пар проталкивает ее через сопло № 2, а затем через сопло № 3. Увеличение площади сечения *D* вызывает уменьшение скорости воды и повышает ее давление до тех пор, пока она не заставит оторваться питательный клапан и вода станет поступать в котел. Работа по поднятию и проталкиванию воды в котел совершается за счет той энергии, которая освобождается вследствие конденсации пара в камере *C*.

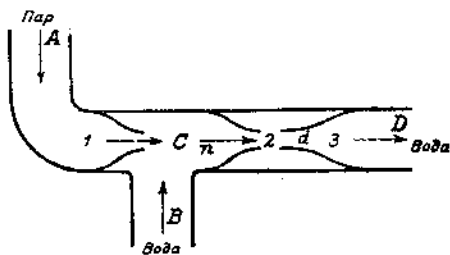


Рис. 251.

§ 260. **Паровая машина.** По паропроводу *K* (рис. 252) пар поступает из котла в паровую коробку *H*, из которой ведут в цилиндр два канала *a* и *t*. Один из этих каналов всегда бывает открыт, другой — закрыт. Открывание и закрывание каналов производится с помощью особого прибора, называемого **золотником**.

Когда поршень находится в правой части цилиндра *C*, как показано на нашем рисунке, золотник закрывает левый канал *a* и открывает правый канал *t*. Пар идет по этому каналу в цилиндр и тол-

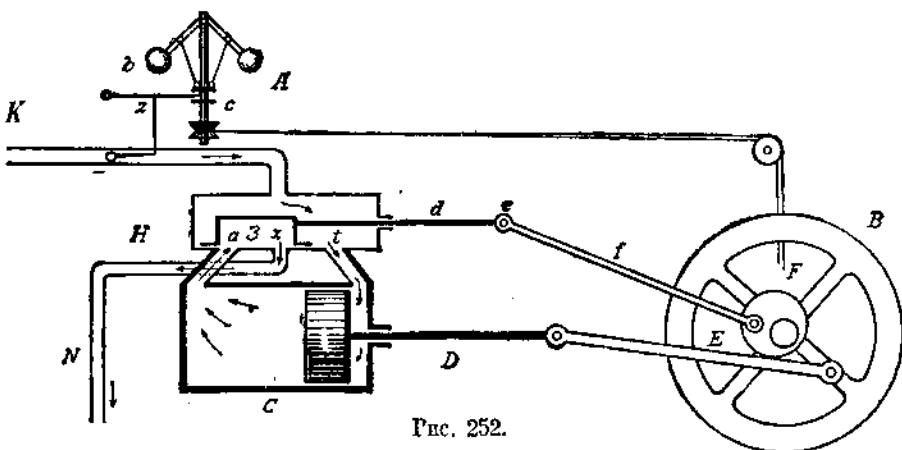


Рис. 252.

кает поршень. Отработанный пар из левой части цилиндра идет по каналу *a* в пространство под золотниковую коробку и по трубе *x* выходит наружу.

Поршень тянет шток *D*, который передвигает шатун *E*, производящий вращение шкива или коленчатого вала машины.

При повороте вала вместе с ним поворачивается также и эксцентрик *F*, центр которого не совпадает с центром вала. Эксцентрик двигает стержень *f*, который приводит в движение тягу *d*, порежущую золотник в направлении, обратном движению поршня.

Как только поршень дойдет до своего крайнего положения слева, тяга передвинет золотник в крайнее правое положение. Он закроет канал t , пар из котла будет поступать в цилиндр по открытому каналу a и толкать поршень слева направо. Отработанный пар из правой части цилиндра по каналу t выходит в пространство под золотник и далее по трубопроводу x наружу.

Когда поршень достигает своих крайних положений справа или слева, направление шатуна D совпадает с направлением штока E . Эти положения носят название *мертвых точек*, так как при них шатун своим давлением не в состоянии повернуть вала.

Как же устранить возможность остановок машины на мертвых точках? Для этой цели на ось вала насаживается тяжелое *маховое колесо В*. Начав вращаться, оно стремится по инерции продолжать свое вращение и выводит машину из мертвых точек.

Чтобы придать машине равномерность хода, устраивают еще центробежный регулятор A . При помощи бесконечного ремня он приводится

во вращение от вала машины. Если движение машины делается очень быстрым, возрастет также и скорость вращения регулятора, при этом увеличится центробежная сила его шаров, они отбросятся в сторону, приподнимут муфту z , которая повернет клапан в паропроводе K , уменьшающий доступ пара к цилиндру. Вследствие этого движение вала замедлится, шары b опадут, и клапан примет свое обычное положение.

§ 261. Работа пара в цилиндре. Пусть пар входит в цилиндр машины под давлением

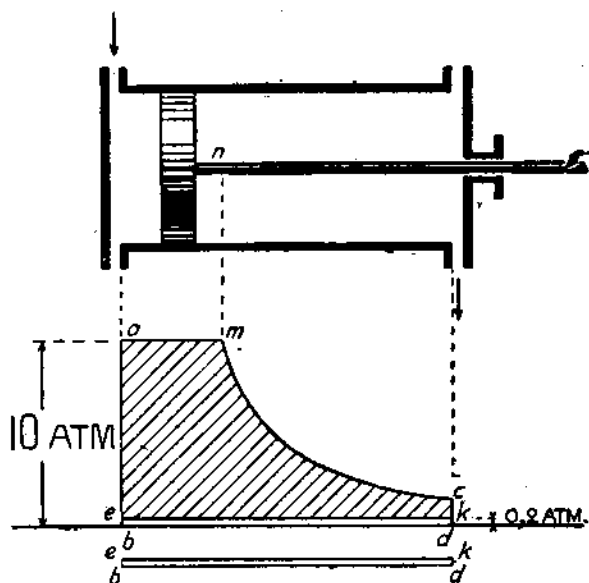


Рис. 253.

10 атмосфер. Когда поршень проходит некоторый путь, хотя бы до точки n (рис. 253), входное отверстие закрывается золотником и впуск пара прекращается, т. е. производится так называемая *отсечка пара*. Дальнейшее движение поршня вправо происходит вследствие расширения пара, давление которого при этом уменьшается.

С противоположной стороны поршня отработанный пар выпускается в холодильник, он оказывает противодействие, равное тому давлению, которое имеется в холодильнике, например 0,2 атмосферы.

Изобразим графически изменение давления пара при движении

поршня (см. нижнюю часть рис. 253). На участке am давление равно 10 атмосферам, в точке m произведена отсечка пара, при перемещении поршня далее до точки c давление пара уменьшается. Площадь полученного нами графика $amcdb$ характеризует величину работы, совершенной поршнем при одном ходе. ¹ Из этой площади необходимо вычесть площадь $ekdb$, характеризующую часть работы, пошедшей на преодоление сопротивления отработанного пара, находящегося под давлением 0,2 атмосферы. Для простоты можно вычертить оба графика вместе, тогда заштрихованная часть $amcke$ и выразит работу, действительно получающуюся при одном ходе поршня.

§ 262. Индикатор. Построенный нами чисто теоретическим путем график работы пара за один ход поршня чрезвычайно интересно срав-

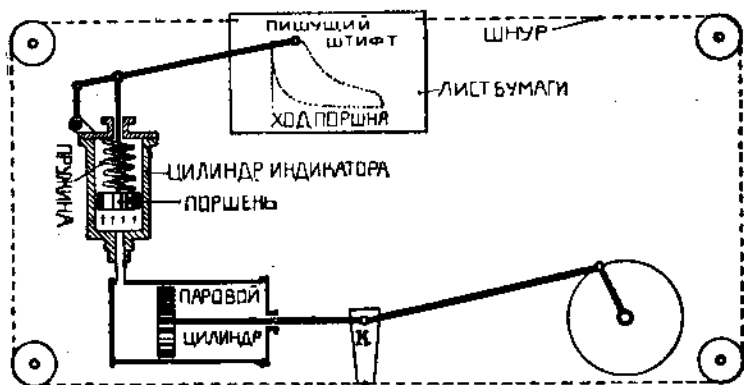


Рис. 254.

нить с работой, производимой поршнем *фактически*, и вычертить график этой фактической работы. Для этой цели следует воспользоваться прибором, называемым *индикатором*, который автоматически дает диаграмму (график) фактической работы пара в цилиндре.

Индикатор состоит из небольшого цилиндра, соединенного посредством трубы с цилиндром машины (на рис. 254 он изображен в значительно увеличенном масштабе по сравнению с цилиндром машины). Давление пара в цилиндре поднимает поршень индикатора вверх, сжимая пружину, и заставляет его рычаг, снабженный пишущим шрифтом, также передвигаться вверх. Пружина индикатора изготовлена таким образом, что повышению давления пара на 1 атмосферу соответствует ее определенное сжатие и, следовательно, повышение пишущего штифта на некоторую также определенную высоту, например, на 1 см.

¹ На вертикальной оси мы откладываем соответствующие давления, которые производит пар на квадратный сантиметр площади поршня при каждом положении поршня. Перемножая величину давления, т. е. движущую силу на пройденный под влиянием этой силы путь, мы получим работу. Площадь графика $amcdb$ и выражает величину работы, совершенной каждым см² площади поршня. Чтобы получить всю работу, совершенную поршнем за один ход, нужно площадь $amcdb$ помножить на число квадратных сантиметров, заключенных в площади поршня.

Лист бумаги, к которому прижимается пишущий штифт, двигается назад и вперед совершенно так же, как и поршень машины. Это движение легко установить, соединив лист при помощи шнурков, перекинутых через ряд блоков (см. рис. 254), с бегунком машины k .

Когда поршень двигается направо, бегунок k тянет шнур и заставляет перемещаться лист бумаги влево, при этом пишущий штифт индикатора вычерчивает на бумаге линию слева направо, соответствующую изменению давления пара при этом ходе машины.¹

Сравним теперь полученную при помощи индикатора диаграмму (она называется *индикаторной диаграммой* — рис. 255) с вычерченной нами на основании теоретических соображений.

Так как поршень невозможно передвинуть вплотную к стенке цилиндра, то между ними всегда остается некоторое свободное пространство (называемое *вредным пространством*).

Это пространство заполняется паром, при этом полезной работы не получается. На нашей индикаторной диаграмме расстояние oa и характеризует вредное пространство.

Открытие и закрытие впускных и выпускных отверстий всегда происходит постепенно. Прежде чем окончательно прекратится впуск пара, входное отверстие сузится, поступление пара уменьшится, и давление вследствие этого упадет — участок на диаграмме ab , соответствующий впуску пара, представляется не горизонтальной прямой, а некоторой кривой. Со-

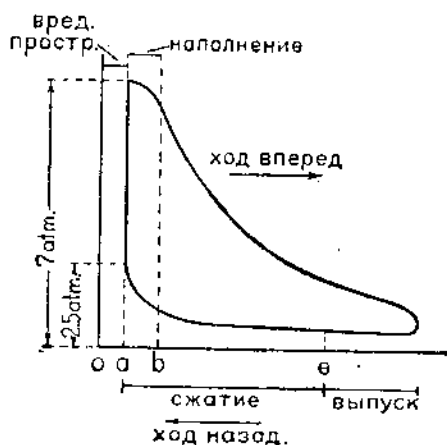


Рис. 255.

вершенно так же будут округлены другие углы индикаторной диаграммы.

Когда при своем обратном ходе поршень дойдет до точки e , закрывается выпускное отверстие, и отработанный пар начнет сжиматься, увеличивая давление, — кривая ea начнет подниматься вверх. Хотя величина полезной работы уменьшается вследствие возрастания противодействия отработанного пара, но зато он отчасти заполняет вредное пространство, в результате чего уменьшается расход пара.

§ 263. Паровая рубанка. Многоцилиндровые машины. Изучая индикаторную диаграмму, судят о правильности работы машины. Рассматривая, например, диаграмму, изображенную на рис. 256, мы замечаем, что уменьшение давления пара во время его расширения в цилиндре после отсечки происходит быстрее, чем это должно было бы быть.

¹ Наш рисунок дает лишь идею применения индикатора. Практически же пишущий штифт индикатора вычерчивает диаграмму на бумаге, надетой на цилиндр, приводимый во вращение от рабочего вала машины.

Зная давление и объем пара, находящегося в цилиндре в момент его отсечки, мы всегда можем вычислить то давление, которое он приобретает, когда поршень дойдет до своего крайнего положения. Пусть вычисленное нами давление соответствует отрезку hc (рис. 256). Если же мы замечаем, что давление, показанное диаграммой, меньше вычисленного нами и равно всего hb , то это значит, что часть пара во время хода поршня обратилась в жидкое состояние.

Чтобы предупредить это вредное явление, обычно окружают цилиндр машины особым кожухом, который носит название *паровой рубашки*. Пространство между внешними стенками цилиндра и паровой рубашкой соединяется с паровым котлом. Находящийся в паровой рубашке пар непрерывно обогревает стенки цилиндра и препятствует охлаждению и конденсации пара, совершающего работу внутри цилиндра.

Так как отработанный пар, поступающий в холодильник, еще способен совершить работу, то его энергию часто используют следующим образом. Устраивают машину, состоящую из нескольких, чаще всего из двух или трех, цилиндров. В первом небольших размеров цилиндре пар только отчасти понижает свое давление, затем он поступает во второй цилиндр больших размеров, здесь снова расширяется и т. д. и лишь из последнего цилиндра поступает в холодильник.

§ 264. Холодильник. Различают два типа конденсации пара: 1) с перемешиванием, 2) с поверхностным охлаждением.

При конденсации пара первым способом отработанный пар вступает в непосредственное соприкосновение с холодной водой, вследствие чего и ожигается. Чаще всего в пространство, куда входит отработанный пар, непрерывно вбрызгивается холодная вода. Образующиеся в холодильнике продукты, т. е. вода, нагретая от соприкосновения с паром, вода, полученная из пара, воздух, который всегда находится в воде, непрерывно удаляются с помощью насоса.

При конденсации пара вторым способом он совершенно не соприкасается с холодной водой; в резервуаре, куда поступает отработанный пар, имеется ряд трубок, по которым непрерывно циркулирует холодная вода. Пар конденсируется, главным образом, на поверхности трубок. Чем холоднее вода, тем соответственно меньше ее расход. Можно считать, что в среднем на 1 кг пара требуется при конденсации впрыскиванием 20—30 л холодной воды, а при поверхностной конденсации вдвое больше.

В тех случаях, когда нет достаточного количества холодной воды, применяют *циркуляционное охлаждение*. Устраивают особые охлаждательные башни, где нагретая от соприкосновения с горячим паром вода падает с высоты нескольких метров и стекает мелкими струйками через ряд брусьев. В это время с помощью насоса продувается холодный воздух, который отнимает тепло от воды, и она вторично поступает в холодильник.

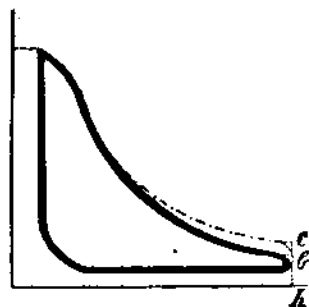


Рис. 256.

На пароходных машинах всегда применяют поверхностное охлаждение, так как вода, образовавшаяся от конденсации пара, вторично поступает в паровой котел. Охлаждение же производится морской водой, которая вследствие значительного содержания солей непригодна для питания котлов.

На паровозах и локомотивах пар выпускается непосредственно в атмосферу. Тепло, отдаваемое холодильнику конденсирующимся паром, может быть, конечно, отчасти использовано на подогревание воды, питающей паровой котел, и различные другие надобности подсобных предприятий (бань, кухонь и т. д.).

§ 265. Эффективная и индикаторная мощность. Мощность, которую можно получить на валу машины, называют *эффективной*; мощность же, которая определяется с помощью индикаторной диаграммы, носит название *индикаторной* — она нам указывает на работу, совершаемую поршнем машины в течение 1 секунды.

Разумеется, эффективная мощность меньше индикаторной на величину потерь от трения в машине.

Говоря об общем коэффициенте полезного действия, мы имели в виду отношение энергии, получаемой на валу машины и измеряемой эффективной мощностью, к затраченной энергии топлива.

Решим задачу. Требуется определить коэффициент полезного действия паровой машины с эффективной мощностью в 100 л. с., расходующей в час 120 кг каменного угля, теплотворная способность которого равна 6000 бол. кал.

120 кг каменного угля выделяют в час 6000×120 бол. кал., что соответствует

$$\frac{6000 \times 120}{60 \times 60} = 200 \text{ бол. кал. в 1 сек.}$$

Работа, эквивалентная 200 бол. кал., выразится произведением:

$$200 \times 427 = 85\,400 \text{ кгм.}$$

Между тем на валу машины получена мощность 100 л. с., т. е. работа в $75 \times 100 = 7500$ кгм в секунду.

Отношение

$$\frac{7500}{85\,400} = 0,088 \text{ или } 8,8\%$$

дает искомый коэффициент полезного действия.

Теперь требуется определить число оборотов вала в секунду. Известно, что отношение эффективной мощности к индикаторной равно 75%, а площадь поршня в цилиндре равна 400 кв. см.

Площадь индикаторной диаграммы 2,5 кгм; ее произведение на число квадратных сантиметров, заключенных в площади поршня, даст работу, совершаемую поршнем за 1 ход:

$$2,5 \times 400 = 1000 \text{ кгм.}$$

Эффективная мощность машины составляет 75% индикаторной, следовательно, работа поршня за один ход, равная 1000 кгм, даст валу машины:

$$\frac{1000 \times 75}{100} = 750 \text{ кгм.}$$

¹ См. примечание к стр. 243.

В секунду машина дает на валу 7500 ж.м., для чего поршень должен совер-
шать

$$\frac{7500}{750} = 10 \text{ ходов,}$$

$$\frac{10}{2} = 5 \text{ оборотов.}$$

§ 266. Паровоз. Первый пригодный для практических целей ло-
комотив был построен англичанином Георгом Стефенсоном в начале

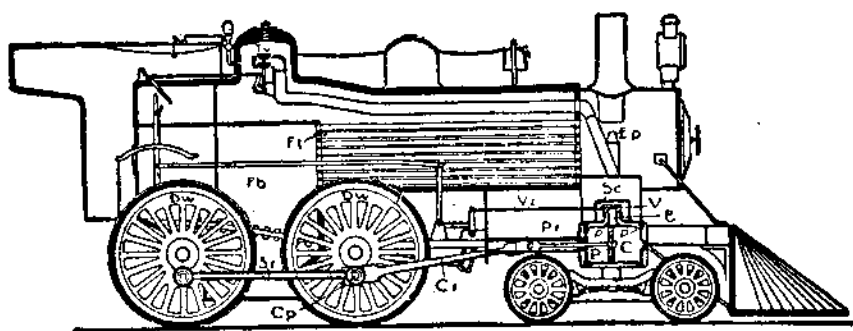


Рис. 257.

прошлого столетия. Им же была построена первая в мире железная
дорога между городами Стоктоном и Дарлингтоном, движение по кото-
рой началось с августа
1825 года.

На рис. 257 изобра-
жен схематический чер-
теж паровоза одного из
самых простых типов.
Отработанный пар вы-
пускается через паро-
выпускную трубку E в
дымовую трубу. Струя
пара увлекает с собой
газообразные продукты
горения, вследствие че-
го усиливается тяга.

На рис. 258 изобра-
жен локомотив, т. е. пе-
редвижная паровая ма-
шина, служащая чаще
всего для приведения
в движение различных
сельскохозяйственных ма-
шин. Его колеса снабжены широкими банда-
жами, вследствие чего локомотив может передвигаться даже по пло-
хим дорогам, не завязая глубоко в грунт

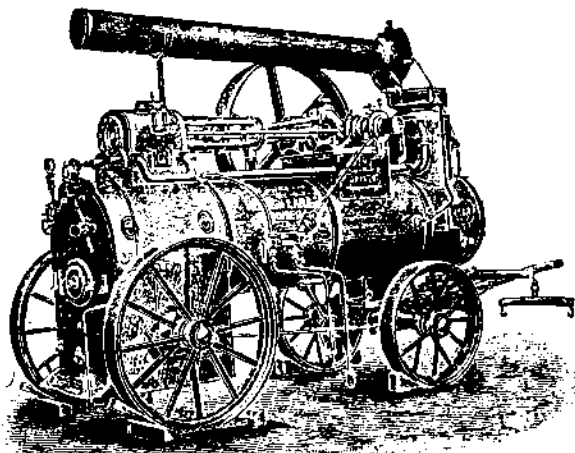


Рис. 258.

§ 267. Паровая турбина. Паровая турбина представляет собой один из распространеннейших тепловых двигателей. Из парового котла пар следует по трубопроводу, который затем разветвляется на несколько отдельных направляющих трубок (их называют соплами). Удары свободно вытекающих из сопел струй пара в лопасти рабочего колеса приводят его в быстрое вращение (рис. 259). Таким образом, в турбине непосредственно используется та кинетическая энергия, которой обладают частицы пара.

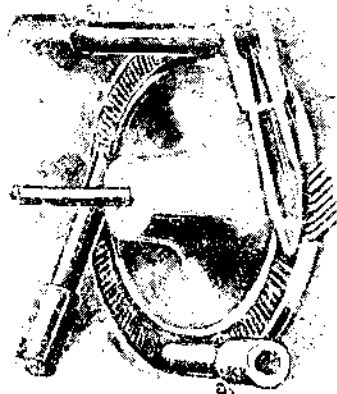


Рис. 259.

Чтобы использовать возможно полное энергия пара, его обычно пропускают последовательно через несколько колес. Так как, выходя из первого колеса, струя изменила свое направление, то, прежде чем пустить ее во второе колесо, заставляют пар пройти через направляющее колесо, неподвижно закрепленное на той же станине, что и сопла. По выходе из второго колеса пар попадает снова на следующее неподвижное направляющее колесо, которое соответственно меняет направление струй пара, затем проходит через третье рабочее колесо и т. д.

На рис. 260 изображена схема расположения рабочих и направляющих колес. Разумеется, турбина должна быть окружена кожухом, отработанный пар из которого направляется в холодильник. Холодильники для паровых турбин применяются почти исключительно с поверхностным охлаждением.

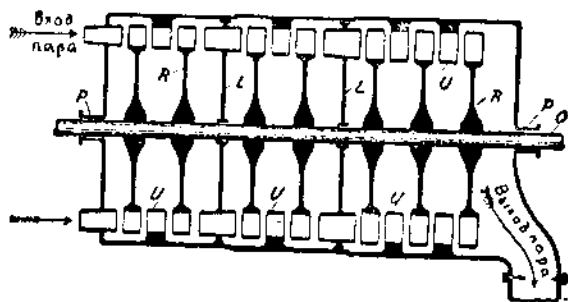


Рис. 260.

Внешний вид паровой турбины показан на рис. 261. Пар приводит во вращение колесо турбины *M* и переходит в левую часть (*HP*). Кожух *C*, окружающий левую часть турбины, показан в приподнятом виде.

§ 268. Потеря тепловой энергии в турбинах. Проследим за судьбой каждой сотни калорий, которые выделяются при сгорании топлива в топке парового котла. Так же, как и для поршневой паровой машины, будем считать, что потеря тепла в котле и трубопроводе составляет 30 кал., т. е. энергия пара, выходящего из трубопровода, содержит $100 - 30 = 70$ кал. из каждых 100 кал., выделяемых топливом.

Потери в холодильнике при применении паровых турбин бывают обычно немного меньше, чем у поршневых паровых машин, так как в этих последних труднее дать возможность сильно расширяться пару, чего значительно легче достичь в турбинах. Будем считать, что потеря в холодильнике равна 49 калориям.

Потери в самой паровой турбине, однако, значительно больше, чем в поршневой паровой машине. Вследствие отклонения некоторых частей пара от правильного направления и образования вихревых движений, трения пара при проходе его через сопла и колеса и т. д.

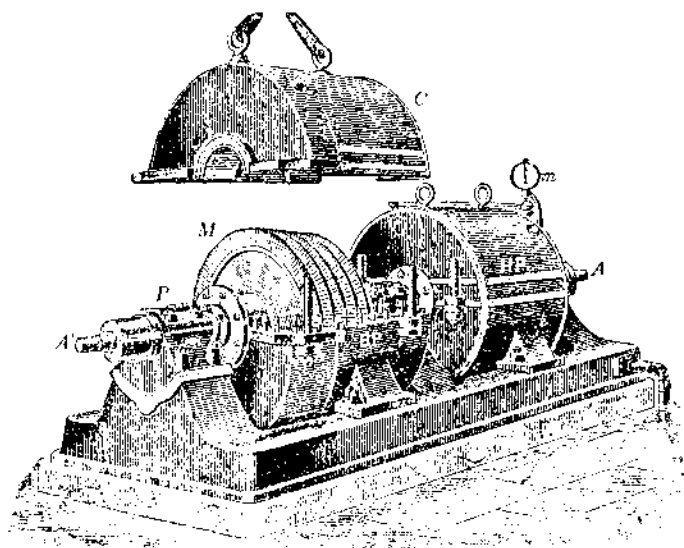


Рис. 261

теряется до $8\frac{1}{2}$ кал. (при работе пара в цилиндрах поршневой паровой машины потеря была всего лишь 5 кал.). Зато на трение частей турбины потеря очень мала, будем считать ее равной всего лишь $\frac{1}{4}$ калории.

Итак, всего превращается в механическую работу

$$70 - \left(49 + 8\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\right) = 12\frac{1}{4} \text{ кал.,}$$

т. е. почти то же самое, что и в поршневой паровой машине.

Коэффициент полезного действия наиболее совершенных паровых турбин достигает 22%, т. е. на 2% выше, чем лучших паровых машин.

§ 269. Применение паровых турбин. Первые пригодные для эксплуатации паровые турбины были построены одновременно (в 1881 г.) шведом Лавалем и англичанином Парсоном

За короткий промежуток времени конструкции турбин значительно улучшились, и они получили широкое распространение.

Первой отличительной особенностью паровых турбин является *исключительная быстрота вращения* (до 40 000 оборотов в минуту). Вследствие этого они стали применяться там, где было необходимо получить быстрое вращение, например, на электрических станциях для приведения в действие динамомашин, для работы центробежных насосов, воздуходувок и проч.

Паровые турбины значительно компактнее, они занимают меньше места, чем поршневые машины такой же мощности. Кроме того, паровые турбины не производят таких сильных толчков, как поршневые машины. Эти качества паровых турбин являются причиной чрезвычайного их распространения в качестве судовых двигателей.

Как показывает опыт, паровые турбины оказываются экономичнее поршневых машин лишь при больших мощностях. Поэтому последнее время поршневые машины строятся обычно для мощности не свыше 1000 л. с.; при больших же мощностях почти исключительно применяются паровые турбины (до 100 000 л. с.). Стоимость паровых турбин выше стоимости паровых машин такой же мощности, что вызывается необходимостью особенной тщательности изготовления их частей и применения высококачественных материалов.

§ 270. Принцип действия двигателей внутреннего сгорания. Как мы видели, приблизительно 50% тепла, выделившегося при сгорании топлива в топке парового котла, бесполезно теряется в холодильнике — избежать этой потери нельзя, так как там пар, конденсируясь в воду, отдает свою теплоту парообразования. Невольно возникает вопрос, нельзя ли упразднить эту потерю, непосредственно вводя горючее в рабочий цилиндр?

Такие машины, в которых горючее вводится непосредственно в рабочий цилиндр, носят название *двигателей внутреннего сгорания*.

Первый двигатель этого типа был построен в 1860 г. французом Ленуаром, но лишь спустя несколько лет появился двигатель, пригодный для эксплуатации, построенный Отто и работавший на светильном газе.

Горючее вводится в рабочий цилиндр в газообразном, паровом или распыленном состоянии. Одновременно с этим вводится и потребное количество воздуха. Посредством электрической искры, пропускаемой автоматически в нужный момент, горючая смесь взрывается, образующиеся газы вследствие сильного нагревания расширяются и толкают поршень. При обратном ходе поршня должно быть открыто выпускное отверстие, через которое выталкиваются в воздух продукты сгорания.

§ 271. Четырехтактные двигатели внутреннего сгорания. Наибольшее распространение получили в настоящее время так называемые *четырехтактные* двигатели, работу которых мы сейчас и рассмотрим подробнее.

Начнем вращать с помощью рукоятки рабочий вал двигателя (рис. 262); поршень, который, допустим, был в крайнем верхнем положении, начнет опускаться вниз и станет *засасывать* через открытый при этом 1-й клапан (*b*) горючую смесь. Когда он дойдет до своего нижнего положения, 1-й клапан (*b*) закрывается (2-й клапан, закрыт). При обратном движении поршня вверх горючая смесь *сжимается*. Как только поршень доходит до крайнего верхнего положения, через

горючую смесь пропускается электрическая искра, происходит взрыв, расширившиеся газообразные продукты горения толкают поршень вниз,ставляя его совершить *рабочий ход*. При обратном (четвертом ходе) клапан 2-й (*г*) открывается, и отработанные продукты *выпускаются в воздух*. Затем опять следуют те же четыре хода. Для лучшего усвоения изложенного составляем таблицу:

Ходы поршня (такты)	Название	1-й клапан (впускной)	2-й клапан (выпускной)
Первый такт	Всасывание	Открыт	Закрыт
Второй такт	Сжатие	Закрыт	Закрыт
Третий такт	Взрыв	Закрыт	Закрыт
Четвертый такт	Выпуск	Закрыт	Открыт

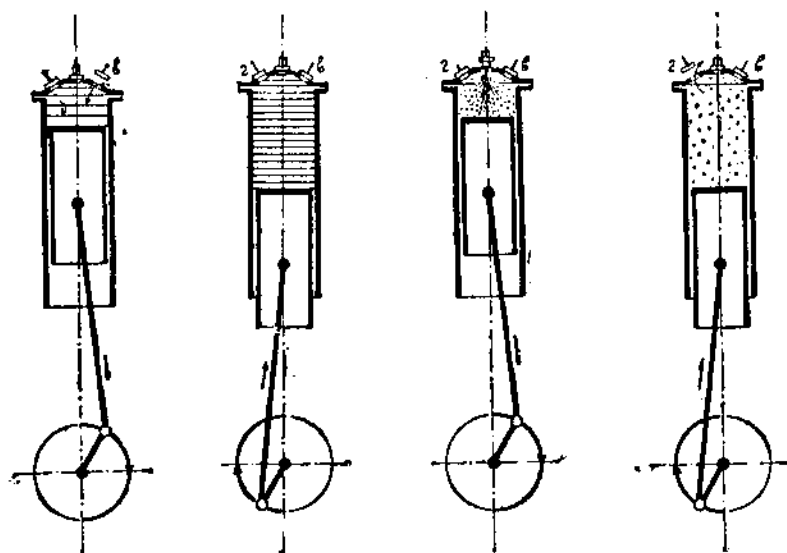


Рис. 262.

Таким образом, из четырех ходов поршня (тактов) только один (третий) является рабочим, остальные же три не только не производят работы, но, наоборот, требуют затраты энергии; например, во время второго такта приходится производить сжатие горючей смеси. Вследствие этого двигатель внутреннего сгорания должен снабжаться тяжелым маховиком, инерция которого было бы достаточно не только для совершения трех нерабочих тактов, но и для придания равномерности хода.

Чрезвычайно удобно пользоваться двигателями внутреннего сгорания, имеющими несколько цилиндров. В то время как в первом цилиндре происходит всасывание, во втором — сжатие, в третьем — взрыв, в четвертом — выпуск. По окончании этого такта рабочий ход произойдет во втором цилиндре, затем в первом и т. д. Таким образом, из четырех цилиндров один всегда дает рабочий ход, тогда как в

остальных цилиндрах в это время происходит подготовительная работа.

Так как при сгорании смеси рабочий цилиндр сильно нагревается, то необходимо принимать меры для его охлаждения. В противном случае может произойти несвоевременное самовозгорание горючей смеси, кроме того, испарится смазывающее поршень масло.

Для охлаждения окружают рабочий цилиндр оболочкой (рубашка); между поверхностью цилиндра и этой оболочкой непрерывно циркулирует холодная вода. В тех случаях, когда имеет место недостаток воды, например, при пользовании двигателем внутреннего сгорания для аэропланов, автомобилей и т. д., прибегают к циркуляционному охлаждению. Чтобы охладить нагревшуюся в рубашке воду, пропускают ее через систему труб, называемую *радиатором*; при этом воздух охлаждает протекающую по трубкам воду.

§ 272. Двухтактный двигатель внутреннего сгорания. Опишем теперь работу двухтактного двигателя внутреннего сгорания, работающего на нефти.

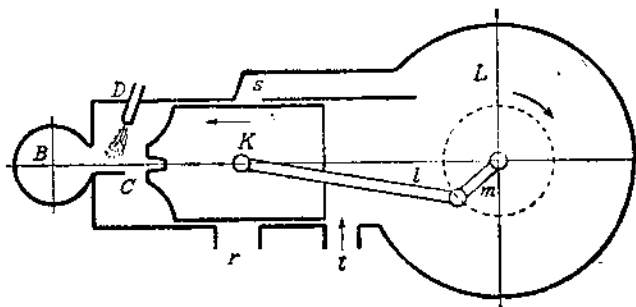


Рис. 263.

Во время первого такта (см. рис. 263) поршень K движется справа налево, сжимая воздух в части цилиндра C . Когда поршень доходит до своего крайнего положения слева, с помощью форсунки D в цилиндр впрыскивается нефть, образующая с воздухом горючую смесь. С помощью раскаленного «запального шара», отмеченного буквою B на рисунке, эта смесь взрывается и толкает поршень слева направо, совершая рабочий ход. Во время этого такта поршень закрывает канал I , посредством которого наружный воздух сообщается с воздухом картера L — железного кожуха, окружающего шатун, кривошип и коленчатый вал машины. После закрытия канала I при дальнейшем движении поршня вправо воздух в картере сжимается. При приближении поршня к крайнему правому положению он открывает канал r , по которому отработанные продукты сгорания устремляются наружу, а также канал s , по которому сжатый воздух из картера врывается в цилиндр и ускоряет удаление из него отработанных газов.

§ 273. Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания могут работать или на *газообразном*, или на *жидком топливе*. Для газовых моторов имеют применение све-

тельный газ, ацетилен, воздушный газ.¹ На металлургических заводах в доменных печах выделяются *доменные газы*, содержащие значительное количество несгоревшего углерода и обладающие большой теплотворной способностью. Раньше эти газы совершенно не использовались, в настоящее же время почти все заводы применяют их для работы газовых моторов, проводящих в действие различные станки, воздуходувки и проч.

В нефтяных районах (у нас в Республике — Баку, в Америке — Пенсильвания и т. д.) выделяются из почвы *натуральные горючие газы*, которые также широко применяются для газовых двигателей.

В виду дороговизны горючего газа, ацетилена и воздушного газа, владельцы газовых моторов все чаще и чаще прибегают к устройству особых установок, служащих для добывания газа из каменного угля. Такие установки носят название *газогенераторов*.

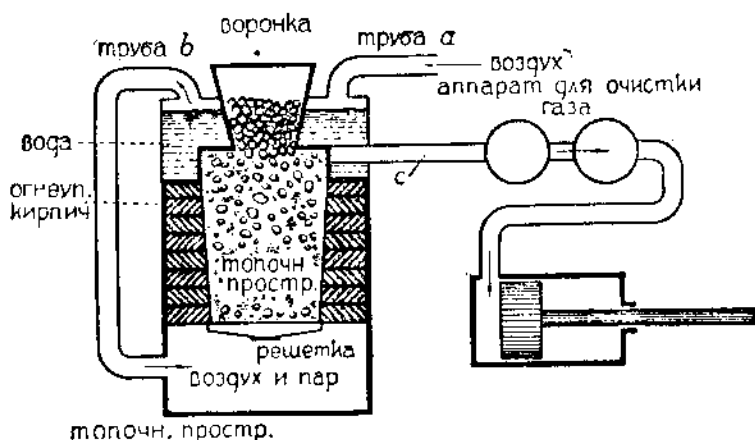
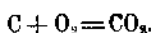


Рис. 264.

Рис. 264 изображает схему устройства газогенератора. Через воронку, расположенную в верхней части печи, насыпается уголь, производится растопка, после чего воронка герметически закрывается.

В трубу *а* вдувается с помощью компрессора воздух, который проходит над водой, находящейся в закрытом пространстве в верхней части печи; при этом воздух увлекает с собою водяные пары и следует далее по трубе *б* в пространство под топкой. Проходя через отверстие в топочной решетке, он поддерживает горение угля. В нижней части печи кислород воздуха соединяется с углеродом топлива, образуя углекислый газ:

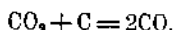


¹ Светильный газ является продуктом сухой перегонки каменного угля, дерева и других горючих. При сгорании 1 м³ светильного газа выделяются до 5 000 бол. кал.

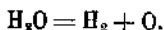
Ацетилен получается при разложении водою особого вещества — карбида кальция. Теплотворная способность его в $2\frac{1}{2}$ раза больше, чем у светильного газа, однако, применение его невыгодно вследствие высокой стоимости кальция-карбида.

Воздушный газ получается при продувании воздуха через некоторые легко испаряющиеся горючие (газолян и др.).

Соприкасаясь с нагретым углем в верхней части газогенератора, углекислый газ отдает углероду часть своего кислорода и превращается в окись углерода:



В то же время водяные пары, захваченные воздухом, при высокой температуре топки в присутствии раскаленного углерода разлагаются на составные части — водород и кислород:



Полученный при этом кислород так же, как и кислород воздуха, идет на образование окиси углерода (CO). Водород же в свободном состоянии вместе с остальными продуктами выходит из газогенератора по трубе с, лишь ничтожная часть его поступает в соединение с углеродом, образуя газ метан (CH₄).

Содержание водяных паров в воздухе регулируют изменением температуры в испарителе. Добавление холодной воды уменьшает образование пара, наоборот, сокращение притока воды в испаритель заставляет его температуру повыситься, а следовательно и возрастает паробразование.

В среднем, состав генераторного газа, полученного из хорошего антрацита, следующий:

А. Горючие газы.

Водорода (H)	12 — 15% (по объему)
Окиси углерода (CO)	26 — 29% „ „
Метана (CH ₄)	1% „ „

Б. Негорючие газы.

Углекислота газа (CO ₂)	5 — 7% (по объему)
Азота (N)	51 — 53% „ „

Очень часто добавка водяных паров к вдуваемому воздуху производится иначе. Из компрессора воздух поступает непосредственно по трубе в газогенератор. К этой трубе присоединяется другая труба, идущая из парового котла, и в газогенератор поступает смесь воздуха и водяных паров.

Иногда добывание газа производится *перемежающимся* способом. В течение нескольких минут пропускается сильный ток воздуха, что повышает температуру в топке (кран из парового котла при этом закрыт), затем прекращается приток воздуха из компрессора и выпускается в течение 7 — 10 минут исключительно водяной пар. При этом из генератора выделяется газ, богатый горючими составными частями,¹ однако, температура печи понижается. Чтобы не прекратить горение, снова пропускается сильная струя воздуха, затем опять пускается водяной пар и т. д. Из генератора газы проходят через очистители или непосредственно в мотор, или в особый резервуар для хранения — *газгольдер*, а из газгольдера уже всасываются мотором.

Жидким топливом чаще всего служат бензин, иногда употребляется бензол, парафиновое масло, газовое масло, спирт, керосин, нефть.

Прежде чем вступить в цилиндр мотора, жидкое горючее предварительно идет из бака в особый сосуд, называемый *карбюратором*, где происходит его распыление и смешение в необходимой пропорции с воздухом.

§ 274. Потеря тепловой энергии в двигателях внутреннего сгорания. Проследим за судьбой каждой сотни калорий, выделяющихся при сгорании топлива.

Около 45 бод. калорий идет на нагревание стенок цилиндра; они передаются охлаждающей воде, окружающей цилиндр, а частично теряются вследствие лученспускания.

¹ До 50% — водорода, 40% — окиси углерода, 1% — метана и лишь всего 9% — негорючих газов (углекислый газ и азот).

Около 30 калорий выталкиваются с отработанными газами, остальные $100 - (45 + 30) = 25$ бол. калорий превращаются в полезную механическую работу.

Таким образом, коэффициент полезного действия двигателя внутреннего сгорания, в среднем, равен 25% , т. е. почти вдвое больше, чем у паровой машины или турбины. В лучших типах двигателей внутреннего сгорания он доходит до 40% .

Следует, однако, иметь в виду, что топливо для двигателей внутреннего сгорания, за исключением случаев пользования доменными или естественными газами, стоит значительно дороже, чем топливо для паровых машин.

§ 275. Сравнение паровых двигателей и двигателей внутреннего сгорания. Чтобы выяснить стоимость топлива для паровых двигателей и двигателей внутреннего сгорания, решим задачу. Требуется определить, во что обходится часовая работа 50-сильной паровой машины, обладающей коэффициентом полезного действия 10% и бензинового двигателя такой же силы, имеющего коэффициент полезного действия 25% , в том случае, если 1 кг угля (с теплотворной способностью в 7500 бол. кал.) стоит 1 коп., а 1 кг бензина — 8 коп.

Работа 50-сильной машины в 1 секунду равна

$$75 \times 50 = 3750 \text{ кг.м.},$$

что составляет в час

$$3750 \times 3600 = 13\,500\,000 \text{ кг.м.},$$

или

$$\frac{13\,500\,000}{427} = 31\,600 \text{ бол. кал.}$$

При сгорании 1 кг каменного угля выделяется 7500 бол. кал.; из них

$$\frac{7500 \times 10}{100} = 750 \text{ бол. кал.}$$

идет на совершение полезной работы.

Число необходимых килограммов угля для часовой работы нашей паровой машины:

$$\frac{31\,600}{750} = 42,1 \text{ кг.}$$

что будет стоить

$$42,1 \times 1 = 42,1 \text{ коп.}$$

При сгорании 1 кг бензина выделяется 10300 бол. калорий; из них полезно на совершение работ идет

$$\frac{10\,300 \times 25}{100} = 2575 \text{ бол. кал.}$$

Таким образом, для 50-сильного мотора необходимо

$$\frac{31\,700}{2\,575} = 12,3 \text{ кг}$$

бензина в течение часа; стоимость его составит

$$12,3 \times 8 = 98,4 \text{ коп.}$$

Итак, несмотря на высокий коэффициент полезного действия, работа бензинового мотора обходится в нашем примере более чем в два раза дороже паровой машины такой же мощности.

Необходимо однако принять во внимание, что при малых мощностях (несколько лошадиных сил) коэффициент полезного действия паровой машины очень мал и вся выгода переходит на сторону двигателя внутреннего сгорания. Кроме того, в тех случаях, когда паровая машина работает с перерывами, расход пара происходит и во время перерыва работы, тогда как во время бездействия двигателя внутреннего сгорания топливо в нем не расходуется.

За паровой машиной необходим постоянный присмотр, которого не требуется при пользовании двигателем внутреннего сгорания.

Сравнивая расход каменного угля при непосредственном сжигании его в топке паровой машины и при применении газогенераторной установки и газового двигателя, мы видим, что выгода оказывается на стороне последних, так как коэффициент полезного действия газового двигателя вместе с газогенератором доходит до 22,6%, против 20% (в лучшем случае) у паровой машины. При этом расчете мы не учли однако расхода энергии на приведение в движение компрессора, нагнетающего воздух в газогенератор, и других затрат на содержание этого последнего.

§ 276. Дизель-мотор. В 1897 г. инженер Дизель построил двигатель внутреннего сгорания, обладающий коэффициентом полезного действия значительно более высоким (до 35%), чем все другие моторы этого типа.¹

Дизель-мотор работает в четыре такта. При первом такте всасывается воздух, а не горючая смесь, как в других двигателях внутреннего сгорания; при втором такте происходит сжатие вошедшего воздуха, что сопровождается его сильным нагреванием (до 600° — 700°); при третьем такте открывается выпускное отверстие и происходит постепенное вбрызгивание горючей жидкости в распыленном состоянии; вследствие высокой температуры сжатого воздуха горючее воспламеняется и постепенно сгорает во время всего третьего такта, производя постоянное давление.

Помимо высокого коэффициента полезного действия, дизель-моторы обладают еще рядом преимуществ перед двигателями внутреннего сгорания. Они работают постепенно без взрывов, развивающих большие давления, не нуждаются в устройстве аппаратов для воспламенения смеси, могут работать не только на нефти, но на различных маслах и других малоценных видах жидкого топлива, непригодного для двигателей внутреннего сгорания иной конструкции.

§ 277. Применение двигателей внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания получили широкое применение во всех тех случаях, когда требуется значительная мощность при небольшом весе и компактности двигателя, ими пользуются на аэропланах, дирижаблях, моторных и подводных лодках, автомобилях, мотоциклах.

В сельском хозяйстве также все шире и шире пользуются их услугами: моторные плуги, бороны, косилки, сеялки, соломорезки и т. д. имеют многие преимущества перед соответствующими паровыми двигателями, а иногда даже и перед электромоторами.

¹ В настоящее время коэффициент полезного действия лучших дизель-моторов достигает 43%.

§ 278. Вопросы и задачи. 367. Почему черный дым, вырывающийся из фабричной трубы, указывает на неисправность топки?

368. Почему коэффициент полезного действия паровоза всегда меньше, чем неподвижной установки такой же мощности?

369. Площадь индикаторной диаграммы, снятой при работе паровой машины, равна 4 см²; площадь поршня 500 см², число ходов поршня в секунду равно 12. Требуется найти эффективную мощность машины, если она составляет 80% от индикаторной.

370. Определить для этой машины расход каменного угля в течение 1 часа, если ее общий коэффициент полезного действия равен 10%, а теплотворная способность топлива равна 6500 бол. кал.

371. Стоимость и перевозка каменного угля по железной дороге составляет 15 рублей с тонны. Требуется сравнить, что выгоднее — пользоваться ли этим каменным углем (его теплотворная способность 7800 бол. кал.) или торфом, теплотворная способность которого 3400 бол. кал. и тонна которого обходится с доставкой в 4 р. 20 коп.

372. Найти мощность четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, если диаметр цилиндра его равен 10 см, ход поршня 15 см, а число оборотов 20 в одну секунду. Среднее давление газов в цилиндре 5 атмосфер. На вал передается 80% мощности в цилиндрах.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЯТАЯ.

ГРЯДУЩАЯ КАТАСТРОФА ОТСУТСТВИЯ ТОПЛИВА.

§ 279. Мировая потребность в энергии. При быстром темпе развития промышленности и техники потребность в энергии делается все большей и большей. Миллионы машин, разбросанных по всему земному шару, расходуют при своей работе колоссальные количества энергии. Вспомните, что мощность турбин одного только трансатлантического парохода «Маджестик» может быть доведена до 100 000 лошадиных сил. Подумайте, как много топлива расходует только один этот пароход.

Из различных видов энергии, коими пользуется современное человечество, в первую очередь следует указать на энергию топлива, которой и покрывается большая часть потребного расхода.

В топках паровозов, пароходов, различных машин на фабриках и заводах, в домашних печах и кухонных очагах каждый день сжигаются миллионы тонн топлива.

§ 280. Каменный уголь. Наиболее важное для человечества топливо это каменный уголь. По вычислению Геологического института С.-А. соединенных штатов общая производительность всех каменноугольных копей земного шара достигла в 1913 году 1342 миллионов тонн.¹ (В 1905 году она равнялась 894 миллионам тонн, в 1910 году — 1082 миллионам тонн). Во время минувшей войны добыча угля несколько уменьшилась, а в настоящее время снова возросла до величины

¹ Вся добыча каменного угля в 1913 году распределялась следующим образом между отдельными странами: Сев.-Амер. соед. штаты — 38,5%, Англия — 21,8%, Германия — 14,2%, Франция — 3,0%, Россия — 2,7%, остальные страны — 19,8%. В 1920 году на долю Америки из мировой добычи приходилось 45%, Англии — 17,9%, Германии — 10,8, СССР — всего только 0,5%. В настоящее время добыча угля в СССР сильно возросла и продолжает увеличиваться.

свыше 1300 миллионов тонн. Если сравнить мировое производство каменного угля в настоящее время и 50 лет назад, то придется отметить, что оно возросло за этот промежуток времени свыше чем в три раза.

Каковы же мировые запасы каменного угля и надолго ли их хватит? — Вот вопрос, который невольно интересует всех нас.

Англия была первой страной, задавшейся целью подсчитать свои топливные ресурсы. В 1866 году была создана особая комиссия для оценки каменноугольных запасов Англии; спустя 35 лет в той же стране была вторая комиссия, которая тщательно проверила предшествовавшие работы и вторично подвела итог каменноугольным запасам.

За последние два десятка лет подобные подсчеты были неоднократно производимы в различных странах. В помещаемой ниже таблице производится свodka наиболее достоверных данных о мировом запасе каменного угля:

Страны	Запас каменного угля в милл. тонн
Соедин. штаты Сев. Америки	3 500 000
Китай	1 500 000
СССР	450 000
Великобритания	180 000
Германия	160 000
Канада	100 000
Другие страны	около 150 000
Всего	свыше 6 000 000

Исходя из расхода в 1300 миллионов тонн, можно считать, что каменного угля хватит более чем на 4 500 лет. Однако следует иметь в виду, что большая часть запасов угля лежит на значительной глубине, добыча откуда представляет не мало трудностей. Кроме того для избежания обвалов в шахтах часть каменного угля должна быть оставлена в виде перегорожек и т. д. Учитывая все это, а также принимая во внимание быстро возрастающую с развитием промышленности и техники потребность в каменном угле, можно считать, что человечество остро почувствует в нем недостаток значительно ранее указанного срока.

§ 281. Нефть. Вторым чрезвычайно ценным топливом является нефть. Расход этого весьма важного для человечества горючего быстро возрастает. За 20-летний период с 1900 по 1920 гг. добыча нефти на всем земном шаре возросла почти в пять раз.

По странам добыча 1920 г., равная 98 миллионам тонн, распределена следующим образом:

Сев.-Америк. соедин. штаты	64,4%	всей добычи
Мексика	23,2%	» »
СССР	4,4%	» »
Остальные страны	8,0%	» »

Согласно данным Северо-Американских соединенных штатов уже большая часть всей американской нефти выкачана из недр земли, а оставшейся нефти при современном расходе хватит лишь на несколько

ближайших лет. В виду того, что наиболее важные запасы нефти приходится именно на долю Америки, следует считать, что мировые запасы нефти будут полностью израсходованы в недалеком будущем.

§ 282. Торф и лес. Следует иметь в виду еще ту значительную поддержку промышленности, которую могут оказать *торф и лесные материалы* некоторых стран, богатых этими видами топлива.

На территории нашего Союза, особенно в ее северной части, имеется множество лесов и торфяных болот. При правильной постановке лесного хозяйства, энергичной добыче торфа (в виду трудности его перевозки, торф в нашем Союзе извлекается в недостаточном по сравнению с его годовым приростом, количестве) и исправной работе транспорта СССР еще на много столетий будет обеспечен топливом.

Таким образом, близкое израсходование нефти и возможные затруднения в добыче каменного угля нам страшны менее, чем другим странам.

§ 283. Другие виды топлива. К приведенному выше перечню различных видов топлива следует добавить: 1) *естественные горючие газы*, выделяющиеся из буровых скважин в некоторых местностях Америки, в нефтеносном районе Баку, заволжских степях и т. д.; 2) *спирт*, который выгодно используется для работы двигателей внутреннего сгорания (его легко добывать из картофеля, которым можно специально для этой цели засеивать громадные площади), и 3) *растительные масла*, также вполне пригодные для работы дизель-моторов.

§ 284. Чем можно заменить топливо. Однако, после полного израсходования каменного угля и нефти, другие виды топлива, повидимому, не смогут удовлетворить потребности промышленности будущего.

Что же сможет спасти человечество от грядущей катастрофы? Неужели нашим потомкам придется отказаться от многих достижений современной техники и заменить машины мускульной силой человека и животных?

Нет. Человечество использует другие виды энергии, которые оно раньше оставляло почти без внимания. В первую очередь необходимо воспользоваться энергией движущейся и падающей воды, приливов и отливов, энергией ветра, а в дальнейшем, быть-может, люди научатся непосредственно применять лучистую энергию солнца для работы различного рода двигателей.

Во второй части нашего учебника, в главе об электрификации, мы познакомимся с устройством станций «белого угля», с различными водяными и ветряными двигателями.

§ 285. Вопросы и задачи для повторения всего четвертого отдела.

373. Что такое малая калория, большая калория и термия?

374. Что называется теплоемкостью вещества?

375. Какое количество тепла нужно затратить, чтобы 5 л воды нагреть от 20° до 70°?

376. На сколько градусов нагревается стакан воды (250 г), если ему сообщить 1 бол. калорию?

377. Какое количество воды можно нагреть от 15° до кипения, затратив 170 бол. калорий?

378. В 0,8 кг глицерина при температуре 15° опустили 75 см³ алюминия при температуре 200°. Определить окончательную температуру тепловой смеси.

Теплоемкость глицерина 0,58, теплоемкость алюминия 0,21, удельный вес алюминия 2,6 г/см³.

379. Чтобы определить температуру пламени горелки, металлический шарик (теплоемкость 0,1) весом в 100 г нагрели до температуры пламени и погрузили в латунный калориметр весом 200 г, где находилось 482 г воды при 10°. Общая температура сделалась равной 25°. Найти температуру пламени (теплоемкость латуни 0,09).

380. Что такое теплотворная способность топлива?

381. Что называется коэффициентом полезного действия нагревательного прибора?

382. В резервуар примуса, коэффициент полезного действия которого 40%, налито 0,5 кг керосина. Какое количество воды можно нагреть до 100°, используя весь керосин, если начальная температура воды 20°? Теплотворная способность керосина 11000 бол. калорий.

383. На примусе, коэффициент полезного действия которого 45%, нагревается 1,65 кг воды с начальной температурой в 10°. Определить температуру нагретой воды, если на нагревание было израсходовано 20 г керосина.

384. Что такое механический эквивалент теплоты? В чем состоял опыт Джоуля?

385. Мотор мощностью в 0,1 л. с. вращает лопасть винта в латунном калориметре ($c = 0,09$) весом в 2 кг, где находится 8 кг ртути ($c_1 = 0,033$). Через какой промежуток времени температура в калориметре поднимется с 15° до 45°?



386. Найти коэффициент полезного действия паровой машины, расходующей в течение часа 0,6 кг каменного угля (теплотворная способность 7200 бол. кал.) на каждую лошадиную силу.

387. В калориметре весом 100 г и теплоемкостью 0,1 мал. кал. находится 500 г воды при 15°. В калориметр бросают сплав свинца с алюминием весом 150 г, нагретый до 100°. Температура смеси получилась 17°. Теплоемкость свинца 0,08 кал. и алюминия 0,2 кал. Определить содержание свинца и алюминия в сплаве.

388. Какие способы передачи тепла вы знаете?

389. Что такое коэффициент внутренней теплопроводности?

390. Что такое конвекция? Как передается тепло лучением?

391. Что такое коэффициент линейного и объемного расширения?

Рис. 265. Какая связь между ними? Как меняется удельный вес тел при нагревании?

392. Как определяется коэффициент объемного расширения жидкостей?

393. Как происходит расширение газов? Как читается закон Гэ-Люссака?

394. Выведите формулу объединенных законов Бойля-Мариотта и Гэ-Люссака.

395. Что такое абсолютный нуль температуры?

396. Железный паропровод имеет длину при 0° 150 м. Какова будет его длина, когда по паропроводу пойдет пар, имеющий температуру 100°?

397. Объясните, какую цель преследует устройство резервуара в верхней части термометра со шкалой до 40°, изображенного на рис. 265?

398. На сколько градусов нужно подогреть ртуть, чтобы ее удельный вес сделался равным 13,55 г/см³?

399. Бандаж одевают на обод вагонного колеса температурой 0° и диаметром 800 мм. Температура, при которой нагревается горячий бандаж, 700° для стали $\alpha = 0,00001$. При наделании между ободом и бандажом для легкости всадки надо иметь (со всех сторон) зазор 0,2 мм. Какого внутреннего диаметра надо точить бандаж при 0°?

400. Привести к нормальным условиям 4,5 л воздуха, находящегося при 23° и давлении 750 мм.

401. Привести к нормальным условиям объем воздуха, равный 400 см³, находящегося под давлением 1,5 атмосферы и температуре 100°.

402. Нефть содержится в железной цилиндрической цистерне, высота которой 6 м, а диаметр основания 5 м. При температуре 0° нефть не доходит до краев цистерны на 20 см. Рассчитать, при какой температуре нефть начала бы переливаться через края цистерны. Расширение цистерны следует принять в расчет. Коэффициент объемного расширения керосина $\beta = 0,001$.

403. В чем состоят законы перехода тел из одного состояния в другое?
404. Что такое теплота плавления и теплота кипения?
405. Два килограмма льда, взятого при 0° , расплавили и обратили в пар при 100° на прамусе с коэффициентом полезного действия 40% . Определить количество израсходованного керосина, если его теплотворная способность 10500 м. к.
406. При высверливании отверстия в железной болванке весом в $0,2$ тонны, налитая в отверстие вода при 20° в количестве 10 л через час закипела и 2 кг ее обратилось в пар, а сама болванка нагрелась до 100° . Какая мощность затрачивалась при сверлении?
407. В снегопеле, коэффициент полезного действия которого 80% , в час сгорает 50 кг дров с теплотворной способностью 3200 бол. кал. Какое количество снега, взятого при -20° , может он обратить в воду за 6 часов работы?
408. Коэффициент полезного действия перегонного куба 50% . Какое количество воды, поступающей в котел при 20° , может он обратить в пар в течение 8 часов, если в 1 час сгорает 40 кг дров с теплотворной способностью 3200 бол. кал.?
409. Почему при смачивании водою руки или иной части тела получается ощущение холода? Почему при смачивании эфиром ощущение холода больше, чем при смачивании водою?
410. Для нагревания ванны, содержащей 200 литров воды при температуре 6° через воду пропускают $11,8$ кг пара при температуре 100° . Определить до какой температуры нагревается вода ванны? Нагреванием стенок ванны пренебречь.
411. Как определяется опытным путем теплота плавления льда?
412. Как определяется теплота кипения воды?
413. Как изменяется точка плавления и кипения тел при изменении давления?
414. Что такое теплота растворения?
415. В чем отличие паров насыщенных от перегретых?
416. В чем состоит закон Дальтона?
417. Что называется абсолютной влажностью? Что называется относительной влажностью?
418. Опишите устройства всех известных вам гигрометров.
419. Почему появляется роса?
420. Что такое критическая температура?
421. Как производится ожижение газов?
422. Объясните устройство паровой машины и парового котла.
423. Каковы потери тепла в паровой машине?
424. Объясните устройство паровой турбины.
425. Объясните устройство двигателя внутреннего сгорания. В чем отличие дизель-мотора?

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

1. Толчение мела в ступке — явление физическое; при обливания мела серной кислотой происходит химическое явление; кипение ртути — физическое явление, а разложение окиси ртути — химическое явление; сжатие сена — физическое явление, гниение сена — химическое явление.

2. Объем камня $V = 20 \times 20 \times 20 = 8000 \text{ см}^3$; вес P равен удельному весу D , умноженному на объем V .

$$P = D \cdot V = 2,6 \cdot 8000 = 20\,800 \text{ г} = 20,8 \text{ кг.}$$

$$3. V = \frac{P}{D} = \frac{300}{0,24} = 1250 \text{ см}^3.$$

$$4. D = \frac{P}{V} = \frac{234}{30} = 7,8 \text{ г/см}^3.$$

5. Объем железного листа $V = \frac{P}{D} = \frac{8,9}{7,8} = 0,5 \text{ дм}^3 = 500 \text{ см}^3$. Искомая толщина $\frac{500}{120 \times 75} = \frac{1}{18} \text{ см.}$

6. Объем проволоки $V = \frac{100}{7,8} \sim 12,8 \text{ см}^3$. Площадь сечения проволоки $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 0,1256 \text{ см}^2$. Длина проволоки $\frac{12,8}{0,1256} \approx 102 \text{ см.}$

7. 43,2 кг.

8. 540 см³.

9. $\sim 10,3 \text{ кг.}$

10. 2,5 г/см³.

11. $\sim 4,14 \text{ кг.}$

12. Около 0,000067 мм.

13. Около 490 г.

14. 100 возов.

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

15. Приблизительно 1320 см/сек.

16. 9,6 км/час, или $\sim 267 \text{ см/сек.}$

17. Немного более 1 минуты.

18. а) приблизительно 208 м, б) 18,75 км, в) 180 км.

19. 50 км/час.

20. Приблизительно через 6 сек

21. 1,2 км.

22. Равнодействующая равна 14 кг и направлена в сторону сил 10 и 25 кг.

23. $\sim 224 \text{ кг.}$

24. $\sim 85 \text{ кг.}$

25. $\sim 81 \text{ т.}$

26. $\sim 87 \text{ г.}$

27. 1) 347 кг и 2) 400 кг.
 28. Тяж растягивается силою 3 020 кг, балка сжимается силою 2 630 кг.
 29. Около 630 кг.
 30. Составляющие силы будут равны 7 кг и 3 кг.
 31. Составляющая S равна 5 кг. Ее точка приложения находится в расстоянии 300 см от точки приложения силы P .
 32. На расстоянии 1,5 м от точки привеса груза 50 кг.
 33. Давление на левую опору 16 т, давление на правую опору 4 т.
 34. 7,8 кг.
 35. К давлению от собственного веса балки добавятся давления от груза: на левую опору 30 кг и 20 кг на правую опору.
 36. 1) 206 кг на левую опору, 2) 244 кг на правую опору.
 37. Давление на опору A $57\frac{1}{7}$ т, давление на опору B $42\frac{6}{7}$ т.
 38. На основании правила для нахождения равнодействующей двух параллельных сил, направленных в разные стороны, имеем:

$$R = P - Q.$$

Умножая обе части равенства на OC , получаем:

$$R \cdot OC = P \cdot OC - Q \cdot OC.$$

Подставляем вместо $OC = OB - CB$:

$$R \cdot OC = P \cdot OC - Q(OB - CB)$$

или

$$R \cdot OC = P \cdot OC - Q \cdot OB + Q \cdot CB. \quad (*)$$

Из пропорции

$$\frac{P}{Q} = \frac{CB}{AC}$$

имеем:

$$P \cdot AC = Q \cdot CB.$$

Заменяем в равенстве (*) $Q \cdot CB$ через $P \cdot AC$:

$$R \cdot OC = P \cdot OC + P \cdot AC - Q \cdot OB,$$

$$R \cdot OC = P(OC + AC) - Q \cdot OB,$$

$$R \cdot OC = P \cdot OA - Q \cdot OB$$

т. е. момент силы R относительно точки O равен алгебраической сумме моментов сил P и Q относительно той же точки.

39. Из формулы $V_t = ct$ находим $c = \frac{V_t}{t} = \frac{400}{20} = 20$ см/сек².

40. $V_t = 36$ км/час = 1000 см/сек; $t = \frac{V_t}{c} = \frac{1000}{25} = 40$ сек.

41. 800 м.

42. Приобретенная скорость V_t находится по формуле $V_t = V_0 - ct$. Когда пароход остановится, скорость V_t сделается равной нулю, т. е. $V_0 - ct = 0$,

откуда $c = \frac{V_0}{t} = \frac{900}{30} = 30$ см/сек².

Пройденный путь S за 30 секунд может быть найден по формуле:

$$S = V_0 t - \frac{ct^2}{2};$$

$$S = 900 \cdot 30 - \frac{30 \cdot 30^2}{2} = 13\,500 \text{ см} = 135 \text{ м}$$

43. Обозначим начальную скорость x , а ускорение y .
Путь, пройденный за 5 сек., = 40 см.

$$40 = x \cdot 5 + \frac{y \cdot 5^2}{2},$$

или

$$5x + 12,5 y = 40.$$

Путь, пройденный за 10 сек., = 130 см.

$$130 = x \cdot 10 + \frac{y \cdot 10^2}{2};$$

$$10x + 50y = 130.$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), находим: $x = 3$ см/сек. и $y = 2$ см/сек².

44. Путь L , пройденный за n -ую секунду, равен пути, пройденному за n секунд минус путь, пройденный за $(n-1)$ секунду:

$$L = S_n - S_{n-1} = \left(V_0 n + \frac{cn^2}{2} \right) - \left[V_0(n-1) + \frac{c(n-1)^2}{2} \right];$$

$$L = V_0 + \frac{c(2n-1)}{2}.$$

45. На основании формулы предыдущей задачи $L = 37,5$ см.

46. Около 6,6 секунд.

$$47. L = \frac{g(2n-1)}{2}.$$

48. Искомое расстояние h определяется как разность расстояний, пройденных свободно падающими телами за 5 и 3 секунды:

$$h = \frac{g \cdot 5^2}{2} - \frac{g \cdot 3^2}{2} = 8g = 7848 \text{ см.}$$

49. V_0 может быть найдено из формулы $h = \frac{V_0^2}{2g}$:

$$V_0 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 100} \cong 44 \text{ м/сек.}$$

50. Высота поднятия пули 490,5 м.

51. Обозначим время до момента встречи тел через x . Падающее тело за x секунд проходит путь $\frac{gx^2}{2}$. Брошенное снизу вверх тело за это же время проходит

$$40 \cdot x - \frac{gx^2}{2};$$

$$\frac{gx^2}{2} + \left(40x - \frac{gx^2}{2} \right) = 100,$$

откуда $x = 2,5$ сек.

Расстояние от поверхности земли до места встречи:

$$100 - \frac{g \cdot (2,5)^2}{2} \cong 69,4 \text{ м.}$$

52. 53,86 м/сек.

53. 100 000 дня.

$$54. 27 \text{ км/час} = \frac{2700000}{3600} \text{ см/сек} = 750 \text{ см/сек.}$$

Ускорение c находится из формулы:

$$v = ct.$$

Подставляя вместо $v = 750$ см/сек и $t = 10$ сек, находим:

$$s = 75 \text{ см/сек}^2.$$

Сила f может быть найдена из формулы:

$$f = ms = 1\,000\,000 \cdot 75 \text{ дин} = \frac{1\,000\,000 \cdot 75}{981 \cdot 1000} \approx 77 \text{ кг}.$$

55. Около $35 \cdot 10^{17}$ т.

56. Около 0,164 г.

57. Центр тяжести стержня находится на расстоянии 60 см от точки приложения груза 2 кг.

58. Задача сводится к определению точки приложения равнодействующей трех параллельных сил: 2 кг, 3 кг и 5 кг (вес стержня). Центр тяжести совпадает с точкой приложения этой равнодействующей. Он находится на расстоянии 55 см от точки приложения груза 2 кг.

59. Все тела, у которых точка опоры выше центра тяжести (подвешенная к потолку лампа, маятник часов и т. д.).

60. Чтобы понизить центр тяжести, а следовательно увеличить предельный угол устойчивости лампы.

61. Конус, так как центр тяжести его ниже, чем цилиндра.

62. Для устойчивости человека отвесная линия, идущая через центр тяжести тела, находящийся в области живота, должна не выходить за пределы опорной поверхности, что может быть только при условии, если человек наклонится вперед.

63. Центр тяжести ваза, нагруженного высоко, лежит выше, поэтому предельный угол устойчивости его меньше, и он опрокинется при меньшем угле.

64. По третьему закону движения, с какой силой птица отталкивает ветку, с такой силой ветка отталкивает птицу.

65. Внизу картонной игрушки помещается свинцовый шаровой сегмент, центр тяжести фигуры очень низок и предельный угол устойчивости больше 90° .

66. Центр тяжести башни расположен у башни таким образом, что сила ее веса проходит внутри опорной поверхности.

67. Центр тяжести стержня с шарами находится ниже точки А.

68. На скоростях 1,5 м/сек и 0,5 м/сек следует построить параллелограмм. (Направление этих скоростей взаимно перпендикулярное.) Диагональ полученного параллелограмма выразит скорость перемещения лодки. Она получится равной 1,58 м/сек.

69. 30 м.

70. Параболу.

71. Время падения приблизительно 4,5 сек. Дальность полета около 45 м.

72. Приблизительно 4 м/сек.

73. Вследствие развиваемой при вращении центробежной силы.

74. Велосипедист наклоняется таким образом, что равнодействующая силы веса и центробежной силы проходит через точку опоры.

75. 4,71 м/сек.

76. Около 143 оборотов в минуту.

77. $V = 9,44$ м/сек; $T = 0,20$ сек; $\omega = 31,4$.

78. 0,8 м.

79. 1) $\frac{\pi}{80} \cdot \frac{1}{\text{сек}}$, 2) $\frac{\pi}{1800} \cdot \frac{1}{\text{сек}}$, 3) $\frac{\pi}{21\,600} \cdot \frac{1}{\text{сек}}$.

80. Около 125 м/сек.

81. ~ 199 кг.

82. Приблизительно 2,5 кг.

83. Под тяжестью поезда мост прогибается, вследствие чего поезд идет по дуге окружности. Давление поезда на мост больше его веса на величину центробежной силы, развиваемой при движении по окружности.

84. $h \approx 2,5$ см.

85. Равнодействующая N веса человека P и центробежной силы f , развиваемой при вращении, должна быть направлена вдоль каната. Из прямоугольного треугольника, образованного силами N , P и f , находим, что $N = \frac{P}{\cos 30^\circ} = \frac{64}{0,866} \approx 74$ кг.

86. Центробежная сила $f = P \operatorname{tg} 30^\circ = 64 \cdot 0,577 \cong 37$ кг. Зная массу вращающегося тела, радиус окружности $= 5 \sin 30^\circ = 2,5$ м и центробежную силу, можно найти скорость вращения $v =$ около 3,9 м/сек.

87. Приблизительно в 17 раз.

88. Обозначим число оборотов маховика в секунду через n , тогда центробежная сила будет равна

$$F = \frac{mr^2}{r} = m \cdot 4\pi^2 n^2 r.$$

Вес маховика

$$P = mg.$$

Так как

$$P = F,$$

то

$$m \cdot 4\pi^2 n^2 r = mg,$$

откуда

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{4}} = 0,35 \text{ оборота}$$

в 1 секунду или ~ 21 оборот в 1 минуту.

89. 300 килограммометров.

90. 2000 кг.м.

91. 4,8 НР.

92. $K = 0,2$.

93. Около $\frac{1}{2}$ НР.

94. 5 мин. 20 сек.

95. 1 тонна.

96. 582,5 кг.

97. 80 кг.м.

98. 24 человека.

99. 3600 НР.

100. Давление земли стремится повернуть стенку относительно точки А в направлении, указанном стрелкой; сила веса стремится произвести вращение в обратном направлении. Определим вращающие моменты каждой из этих сил.

Момент силы давления земли $= 500 \text{ кг} \times 2 \text{ м} = 1000 \text{ кг.м.}$

Момент силы веса стенки $= 2000 \text{ кг} \times \frac{1,4}{2} \text{ м} = 1400 \text{ кг.м.}$

Так как второй момент больше первого, то, опрокидывания не произойдет.

101. Чтобы вызвать движение, нужна сила $0,32 \cdot 2000 = 640$ кг. Давление земли составляет всего лишь 500 кг, поэтому скольжение не произойдет.

102. Рычаг 2-го рода.

103. На расстоянии 18 см.

104. Назовем длину левого плеча l_1 , правого l_2 , а искомый вес груза через X . Условие равновесия весов при первом взвешивании — равенство моментов сил относительно точки опоры:

$$Xl_1 = P_1 l_2$$

То же при втором взвешивании:

$$Xl_2 = P_2 l_1$$

откуда

$$X^2 l_1 l_2 = P_1 P_2 l_1 l_2,$$

или

$$X^2 = P_1 P_2, \text{ т. е. } X = \sqrt{P_1 P_2}.$$

105. Приблизительно 211 кг.

106. Около 28 кг.

107. 200 кг.

108. ~ 390 кг.

109. Движение поезда при подъеме является движением по наклонной плоскости силой, параллельной длине наклонной плоскости, т. е.

$$N = Q (\sin \alpha + K \cos \alpha)$$

Так как угол α очень мал, то $\sin \alpha$ можно заменить $tg \alpha$, т. е. отношением высоты подъема H к основанию B , а

$$\frac{H}{B} = i$$

и является уклоном.

Сос α принимают обычно равным единице, так как для малых углов он весьма мало отличается от единицы. В таком случае формула принимает вид:

$$N = Q (i + K),$$

где K — коэффициент тяги, принимаемый обычно в среднем за 0,005.

110. Около 6,8 м.

111. Груз P поднимается при помощи подвижного блока, который дает выигрыш в силе в два раза. Конец цепи от подвижного блока перекинут через неподвижный блок и наматывается на вал ворота, приводимого в движение посредством системы зубчатых колес D , B , A вращением рукоятки K .

112. Причиной звука являются колебания, совершаемые звучащим телом и передаваемые уху через воздух или иную среду. Колеблющиеся частицы звучащего тела и передающей среды (например, воздуха) обладают кинетической энергией, вследствие чего звук также следует рассматривать как один из видов энергии. Чтобы произвести звук, необходимо затратить какую-нибудь другую энергию. Чаще всего мы вызываем звук, производя удар или трение. Он может быть создан за счет тепловой, электрической или химической энергии.

Коснитесь звучащего колокола деревянным шариком, подвешенным на нити, и вы заметите, как шарик будет отскакивать от колокола, т. е. звуковые колебания будут совершать в этом случае некоторую механическую работу.

$$113. \frac{mv^2}{2} = \frac{2000 \cdot (300)^2}{2} = 90\,000\,000 = 9 \cdot 10^7 \text{ эргов.}$$

$$114. \frac{mv^2}{2} = FS, \text{ где } F — \text{сила, идущая на преодоление трения} = \mu P = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ кг} = 200 \text{ г} = 200 \cdot 981 \text{ дина};$$

$$9 \cdot 10^7 = 200 \cdot 981 \cdot S; \quad S = \frac{9 \cdot 10^7}{200 \cdot 981} \approx 458 \text{ см.}$$

115. Приблизительно 2,8 км.

116. Живая сила сваряда в момент удара равна работе по преодолению сопротивления FL , где F — средняя величина силы, задерживающей движение, а $L = 1$ м — пройденный путь

$$\frac{20 \cdot 1000 \cdot (25\,000)^2}{2} = F \cdot 100,$$

где F — выражено в динах. Отсюда F — около 63,4 т.

117. $\sim 18 \cdot 10^3$ кгм.

118. ~ 100 м/сек.

119. ~ 2 м/сек.

Вопросы и задачи для повторения всего второго отдела.
(даны ответы только на задачи.)

123. 112,5 м/сек.

127. 5 кг.

129. 18,75 кг на каждую опору.

130. 60 кг на левую опору и 10 кг на правую опору.

131. Равнодействующая равна 40 кг и находится на расстоянии 75 см от меньшей силы.

134. 300 см.

140. 7,8 сек.

141. $\sim 122,5$ м.

142. $\sim 215,8$ м.

143. $\epsilon = 0,25$ м/сек², $V = 15$ м/сек.

144. Приблизительно через 2 сек.

145. 200 дни.

153. 1) ~ 44 м, 2) 60 м.

157. ~ 221 см/сек.

160. 7,5 м.

161. 4 л. с.

163. 100 м.

164. 50 кг.

165. 55 кг.

166. 170 кг.

170. 40 см.

171. 12,544 кг.

175. Запас потенциальной энергии равен $5 \times 10 = 50$ ккал.

Приобретенная скорость при достижении телом поверхности земли.

$$V = \sqrt{2gH} \cong \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 5} = \sqrt{100} = 10 \text{ м/сек.}$$

Кинетическая энергия в технических единицах

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{1 \cdot 10^3}{2} = 50 \text{ ккал,}$$

т. е. масса тела в технических единицах массы равна

$$\frac{10}{10} = 1 \text{ тех. ед. массы.}$$

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

176. 2 кг.

177. На глубину 8 м.

178. Давление ртути $10 \times 5 \times 8 \times 13,6 = 5440$ а.

179. 4352 г и 2176 а.

180. 30 см.

181. 2 м.

182. 2,5 кг.

183. 2,5 кг.

184. $\frac{25}{0,9} \cong 28$ см.

185. 0,92 г/см³.

186. 100 см.

187. Давление воды возрастает по мере увеличения глубины погружения.

188. При закрытых воротах № 1, через ворота № 2, судно входит в камеру, ворота № 2 закрываются и шлюзовая камера наполняется водой. Когда уровень воды достигнет того же горизонта, что и в участке А, открываются ворота № 1 и судно переходит в участок А.

189. На ту стенку, где нет отверстия, давление больше.

190. Ракета летит вследствие неуравновешенного давления. Давление газообразных продуктов сгорания на боковые стенки взаимно уравновешивается, давление же вверх не уравновешивается давлением вниз, так как газы внизу свободно выходят наружу.

191. При открытых кранах С и D уровень воды в трубке такой же, как и в котле. При закрытом кране С и возрастании давления пара в котле уровень воды в трубке поднимается.

192. Приблизительно 0,9.

193. Столб ртути поднимется приблизительно на 0,6 см.

194. 57 см.

195. 1,27 атмосферы.

196. 1,053 кг/с.м³.

197. а) Приблизительно 11,5 м; б) приблизительно 12,4 м.

198. $\sim 3,56 \text{ кг/см}^2$.

199. 405 м.

200. 240 г.

201. 196,4 кг.

202. 3 атмосферы.

203. Приблизительно 260 кг.

204. Приблизительно 13 кг.

205. После первого поднятия поршня воздух, занимавший объем V , займет объем $V + W$ и будет находиться под давлением X_1 :

$$HV = X_1(V + W); X_1 = H \frac{V}{V + W}.$$

При опускании поршня объем воздуха W выйдет из насоса. При следующем поднятии поршня воздух, занимавший объем V , займет объем $V + W$ и будет находиться под давлением X_2 :

$$X_1 V = X_2(V + W); X_2 = X_1 \frac{V}{(V + W)} = H \left(\frac{V}{V + W} \right)^2.$$

Через n качаний давление X_n будет равно $H \left(\frac{V}{V + W} \right)^n$.

206. К давлению H , которое имел воздух в сосуде, после каждого качания будет добавляться давление $H \frac{W}{V}$. После n качаний давление в сосуде будет равно $H \left(1 + n \frac{W}{V} \right)$.

207. Площадь поршня $\frac{\pi d^2}{4} = 78,5 \text{ см}^2$. Давление на $1 \text{ см}^2 = \frac{500}{78,5} \cong 6,37 \text{ кг/см}^2$.

Высота поднятия воды $h = 63,7 \text{ м}$.

208. 136 г.

209. 234 г.

210. $d = \frac{235}{235 - 141} = 2,5 \text{ г/см}^3$.

211. $d_1 = 7,875 \text{ г/см}^3$; $d_2 = 0,8 \text{ г/см}^3$.

212. $V = \frac{204}{7,8 - 1} = 30 \text{ см}^3$; $P = 234 \text{ г}$.

213. 48 см³.

214. Приблизительно 0,57.

215. Назовем глубину погружения цилиндра X . Условия равновесия цилиндра: вес его равен весу вытесненной им воды:

$$\frac{\pi d^2}{4} 29 \cdot 0,7 + \frac{\pi d^2}{4} \cdot 1 \cdot 7,8 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 1 \cdot X,$$

где d — диаметр цилиндра,

$$29 \cdot 0,7 + 7,8 = X; X = 28,1 \text{ см}.$$

216. $\frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot 1,9 \cong 6 \text{ г}$.

217. Приблизительно 0,84.

218. Объем полости 20 см³.

219. 0,965 г/см³.

220. 4 тонны.

221. В пресной воде 3000 м³. В морской воде в 1,03 раза меньше.

222. Объем вытесняемой плотом воды при полном погружении: $20 \times 4 \times \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cong 2,5 \text{ м}^3$. Его вес 2 т. Подъемная сила $2,5 - 2 = 0,5 \text{ т}$.

$$223. 50 \cdot X \cdot 1 = 20 \cdot 0,065 \cdot X = 0,026; m = 2,6 \text{ см.}$$

$$224. 80 \times 20 \times 1,5 = 2400 \text{ т.}$$

$$225. 11,5 \text{ тонны.}$$

226. Сила их веса слишком мала, чтобы прорвать поверхностный слой жидкости.

$$227. K = \frac{2500}{\pi(80 + 78)} \cong 5 \text{ мг/мм.}$$

$$228. \text{Из формулы } K = \frac{P}{\pi(D + D_1)} \text{ находим } P = K\pi(D + D_1) = 7,6 \cdot 3,14 (70 + 68) \cong 3290 \text{ мг.}$$

Обозначим растяжение пружины через X . В таком случае $\frac{X}{50} = \frac{3290}{1000}$; $X = 164,5 \text{ мм.}$

$$229. p = 796 \text{ кг/см}^2; l = 1,59 \text{ мм.}$$

$$230. \text{Принимая предел прочности за } 5000 \text{ кг/см}^2, P_1 \cong 63 \text{ т.}$$

$$231. \text{Принимая предел прочности за } 5000 \text{ кг/см}^2, \text{ находим } F = 0,2 \text{ см}^2.$$

$$232. \text{Приблизительно } 0,8 \text{ см.}$$

$$233. \text{Около } 160 \text{ кг/см}^2.$$

$$234. \text{Около см.}$$

Вопросы и задачи для повторения всего третьего отдела.

$$239. 21 \text{ 352 г.}$$

$$240. 12 \text{ т.}$$

$$241. 31,4 \text{ г.}$$

$$242. 25,5 \text{ см.}$$

$$243. 14,462 \text{ кг/см}^2.$$

$$246. 1) 10,33 \text{ м } 2) \frac{10,33}{0,8} \cong 12,9 \text{ м.}$$

$$247. \text{Около } 14 \text{ тонн.}$$

$$252. 4 \text{ атмосферы.}$$

$$253. 47,5 \text{ л.}$$

$$254. 1,75 \text{ атмосферы}$$

$$255. \sim 0,35 \text{ атмосферы.}$$

$$256. \text{Вследствие уменьшения наружного давления.}$$

$$257. \text{Вследствие уменьшения атмосферного давления при подъеме на горы или при поднятии на аэроплане.}$$

$$261. \text{Перетянет свинцовая гири, т. к. она имеет меньший объем и вследствие этого меньше потеряет в весе при погружении в воду.}$$

$$262. \sim 2,33 \text{ г/см}^2.$$

$$263. \sim 2,5 \text{ г/см}^2.$$

$$264. \text{Перетянет гири, погруженная в спирт.}$$

$$267. 0,625 \text{ г/см}^2.$$

$$268. 440 \text{ г.}$$

$$269. \text{Вес останется без изменения, т. к. дерево вытеснит воды столько же, сколько само весит.}$$

$$280. 0,1 \text{ см}^2.$$

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

$$281. 1\,000\,000.$$

$$282. 50^\circ.$$

$$283. 15 \text{ кг.}$$

$$284. 372 \text{ бол. кал.}$$

$$285. 42^\circ.$$

$$286. 2 \text{ кг.}$$

$$287. 80^\circ.$$

288. Обозначим общую температуру через X и составим калориметрическое уравнение:

$$0,095 \cdot 1000(100 - X) = 1 \cdot 500(X - 20) + 0,095 \cdot 200 \cdot (X - 20),$$

откуда $X \cong 32,4^\circ$.

289. $401 \frac{2}{3} \text{ г.}$

290. $29,45^\circ$.

291. $\sim 0,054$.

292. $\sim 25,6 \text{ г.}$

293. $\sim 28\%$.

294. Немного более 43 мин.

295. Работа при падении $0,5 \cdot 7,8 \cdot 25 = 97,5 \text{ т.м} = 97\,500 \text{ кг.м}$. Она превратилась при ударе в $\frac{92\,500}{427} \cong 218 \text{ бол. кал.}$ Чтобы нагреть $0,5 \cdot 7,8 = 3,9 \text{ т} = 3900 \text{ кг}$ железа на 1° , потребно $0,11 \cdot 3900 = 429 \text{ бол. кал.}$ Таким образом, температура куска железа могла повыситься на $\frac{228}{429} \cong 0,5^\circ$.

296. 13,5 г.

297. Около 40% .

298. $\sim 30\%$.

299. 395 т.

300. Около 11,4 часа.

301. Около 380 часов.

302. Приблизительно 1720 т.

303. $\sim 9200 \text{ л. с.}$

304. $\sim 7600 \text{ бол. кал.}$

305. Дерево — плохой проводник тепла.

306. Для уменьшения потерь тепла.

307. Металл — хороший проводник тепла; ковер — плохой проводник тепла.

308. Сверху.

309. Ртуть на солнце и гревается лучеиспусканием.

310. Вследствие нагревания лучеиспусканием.

311. Ветер способствует охлаждению тел, так как заставляет постоянно сменяться окружающие тела частицы воздуха; он непрерывно удаляет уже нагретые частицы и заменяет их холодными.

312. Около 6° .

313. Около 18° .

314. На 9,6 см.

315. 4,95 м.м.

316 — 317. Для избежания разрушения при изменении длины вследствие изменения температуры.

318. От охлаждения брус укорачивается и ломает стержень.

319. $\sim 99,94 \text{ м.м.}$

320. $\sim 0,13 \text{ м.м.}$

321. Около 302 см^3 .

322. Приблизительно на $4,5 \text{ см}^3$.

323. $1026,1 \text{ см}^3$.

324. Ребро куба при 500° равно 100,6 см. Объем его равен $(100,6)^3 \text{ см}^3$.

325. Приблизительно при 328° .

326. $d_1 = \frac{d_0}{1 + \beta t}$; приблизительно 7,69. г/см.

327. Вследствие расширения керосина при нагревании.

328. Объем увеличится на $24,45 \text{ см}^3$.

329. Приблизительно на 278° .

330. На $40,4^\circ$.

331. Приблизительно 2,9 см.

332. Около 11 м^3 .

$$833. \frac{V_0 P_0}{273} = \frac{VP}{T}; V_0 = \frac{5 \cdot 775 \cdot 273}{248 \cdot 760} \cong 5,6 \text{ л.}$$

834. Давление воды на глубине 10 м — 1000 г/см². Оно равноценно давлению столба ртути высотой $\frac{1000}{13,6} \cong 73,5$ см. Составляем уравнение Клапейрона.

$$\frac{2 \cdot 780}{293} = \frac{X \cdot (750 + 735)}{277}. \text{ Из этого уравнения находят } X \cong 1 \text{ л.}$$

835. 628 кг.

836. ~ до 133°.

837. При нагревании сосуда А объем его возрастает на $0,25 \cdot X$ см³, где X — величина передвижения капельки ртути (в см).

Применим уравнение Клапейрона для воздуха в шаре А:

$$\frac{500 \cdot P_0}{273} = \frac{(500 + 0,25X)P_1}{283}; \quad (1)$$

то же для шара В:

$$\frac{300 \cdot P_0}{273} = \frac{(300 - 0,25X)P_1}{287}. \quad (2)$$

P_0 — первоначальное давление в шарах А и В, P_1 — давление после изменения температур.

Разделив (1) равенство на (2), имеем:

$$\frac{500}{300} = \frac{(500 + 0,25X)287}{(300 - 0,25X)283}.$$

Из этого уравнения находится X.

838. 1) 327°, 2) 177°, 3) 7°, 4) — 73°, 5) — 145°.

839. 1) 248°, 2) 273°, 3) 316°, 4) 814°.

840. Вследствие расширения воды при замерзании.

841. Вследствие расширения чугуна при затвердевании.

842. Вследствие расширения воды при замерзании.

843. Измеряя температуру кипения воды, можно найти из таблиц соответствующее атмосферное давление.

844. 2267,5 бол. кал.

845. Около 550 г.

846. 330 бол. кал.

847. 0,5 кг.

848. 147 г л. кал.

849. ~ 48,3°.

850. ~ 60 г.

851. ~ 96,6°.

852. 400 г льда и 200 г воды при 0°.

853. Около 24°.

854. При 42°.

855. Калориметрическое уравнение $0,095 \cdot 200 (x - 10) + 300 (x - 10) =$
 $I = 20 \cdot 537 + 20 (100 - x)$, откуда $x \cong 47°$.

856. Около 592 г.

857. 0,92 кг.

858. 1584,4 бол. кал.

859. 29,4 термин.

860. Серная кислота поглощает водяные пары.

861. Вследствие конденсации находящихся в комнате и между рамами водяных паров при их соприкосновении с холодными поверхностями.

862. Вследствие более низкой температуры зимой выдыхаемые пары конденсируются.

863. Испарение воды днем происходит более интенсивно, вследствие чего была велика абсолютная влажность.

864. Абсолютная влажность 8,2 г. Относительная $\frac{8,2}{12,8} \cong 64\%$.

865. По формуле Реньо полная теплота пара при $t = 171^\circ$.

$$1 = 606,5 + 0,305 \cdot 171 = 658,7 \text{ бол. кал.}$$

15 бол. кал. уже было израсходовано для нагревания воды до 15° . Таким образом, расход тепла составит на килограмм $658,7 - 15 = 643,7$ бол. кал., а на 50 кг $643,7 \cdot 50 = 32\,185$ бол. кал.

866. Около 6305 бол. кал.

867. Происходит неполное сгорание топлива, так как черный дым содержит частицы негоревшего углерода.

868. Главным образом вследствие отсутствия холодильника.

869. 256 л. с.

870. Около 250 кг.

871. Каждая 1 термия тепла, выделенного из каменного угля, обойдется $\frac{1500}{7800} \cong 0,2$ коп. 1 термия тепла, выделенного из торфа, обойдется $\frac{420}{3400} \cong 0,12$ коп.

872. Около 6,5 л. с.

Вопросы и задачи для повторения всего четвертого отдела.

875. 250 бол. кал.

876. 4° .

877. 2 кг.

878. 30° .

879. 775° .

882. Около 28 кг.

883. 70° .

885. $\sim 12,5$ мин.

886. $\sim 14,6\%$.

887. Алюминия 45,8 г и свинца 104,2 г.

896. 150,18 м.

897. Чтобы термометр не лопнул при нагревании выше 40° .

898. $\sim 20,7^\circ$

899. 794,8 мм.

400. 4,85 л.

401. 439 см³.

402. Около 35.

405. ~ 341 г.

406. 5,75 л. с.

407. 3,2 тонны.

408. Около 830 кг.

409. На испарение воды расходуется тепло, отнимаемое от смоченной водою части тела. Эфир испаряется значительно быстрее воды, вызывая вследствие этого более сильное ощущение холода.

410. $\sim 41,1^\circ$.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютный нуль 199
 Анеронд 120
 Ареометры 142
 Арматура котла 240
 Архимеда закон 187
 Артезианский колодезь 114
 Атмосферное давление 116
 Аэроплан 150
 Аэростат 148
 Барограф 123
 Барометры 119
 Блок 78
 Бойля-Мариотта закон 124
 Ведущие колеса паровозов 83
 Величины физические 7
 — измерение 7
 Весы 78
 Вешивание на неверных весах 94
 Винт 90
 Влажность абсолютная 224
 — относительная 223
 Влияние давления на температуру плавления 216
 Влияние давления на температуру кипения 214
 Водомерная трубка 116
 Водопровод 113
 Воздушный шар 147
 Ворот 81
 Всемирного тяготения закон 48
 Газовая постоянная 201
 Газогенератор 253
 Газы, передача давления 106
 — расширение 197
 — сжатие 228
 — теплоемкость 202
 Генераторный газ 253
 Гигрометр 226
 Гигроскоп Соссюра 227
 Гидростатический парадокс 110
 Гипотеза 17
 — о строении вещества 17
 Гиря опыт 175
 Горение 183
 Графический метод в физике 13
 Гука закон 158
 Гз-Люссака, закон 198
 Дальтона закон 223
- Двигатели внутреннего сгорания 250
 — — — двухтактные 252
 — — — топливо для 252
 — — — четырехтактные 250
 Движение 25
 — вращательное 64
 — неравномерное 43
 — поезда по закруглению 67
 — равнозамедленное 46
 — равномерное 26
 — равноускоренное 44
 — тела брошенного горизонтально 62
 — отвесно вверх 52
 Движений сложение 60
 Движения графики 46
 — скорость 26
 Деформация 156
 — растяжения 157
 Джоуля опыт 173
 Дизель-мотор 256
 Дина 47
 Дирижабль 149
 Домкрат 91
 Дьюара сосуд 185
 Дробная перегонка 208
 Дюлонга и Пти, способ 194
 Дэви, лампа 179
 Железнодорожного пути, устройство 86
 Живая сила 95
 Жидкости, передача давления 106
 Жидкий воздух 230
 Закон Архимеда 187
 — Бойля-Мариотта 124
 — Бойля-Мариотта—Гз-Люссака 198
 — всемирного тяготения 48
 — Гука 158
 — Гз-Люссака 198
 — Дальтона 223
 — Паскаля 108
 — независимости действия сил 60
 — перехода тел из одного состояния в другое 205
 — сохранения вещества 24
 — сохранения энергии 103
 Зубчатые колеса 84
 Измерение величин 7
 Импульс силы 98
 Индикатор 243

- Индикаторная диаграмма 241
 Инерция 27
 Изгиб 160
 Инжектор 241
 Искусственный лед 231
 Кабестан 83
 Калорийность пищи 172
 — топлива 170
 Калориметр 169
 Калориметрическая бомба 171
 Калория 184
 Капиллярность 155
 Кессоны 133
 Килограммометр 91
 Кишение 2 6 и след.
 Клапейрона уравнение 200
 Клин 92
 Количество движения 98
 Конвекция 182
 Конденсация пара 233
 Коэффициент безопасности 159
 — внутренней теплопроводности 180
 — линейного расширения 186
 — объемного расширения 191
 — — — газов 197
 — поверхностного натяжения 153
 — полезного действия 81 и след.
 172, 175
 — пропорциональности 12
 Критическая температура 228
 Лебедка 86
 Линде прибор 230
 Лошадиная сила 75
 Лучеспускание 201
 Манометры 131
 Масса 47
 Мениск 154
 Механический эквивалент тепла 175
 Многоцилиндровые машины 244
 Модуль Юнга 158
 Мощность 75
 — индикаторная 246
 — эффективная 246
 Наблюдение 9
 Нажим Прони 234
 Наклонная плоскость 87
 Несмачивание 154
 Насосы водяные 126
 — воздушные 123
 Насыщенные пары 221
 Ненасыщенные пары 223
 Нефть 248
 Нивелировка барометрическая 120
 Опыт 9
 Относительность движений 63
 Падение тел 48
 Пара сил 38
 — — — момент 42
 — — — плечо 42
 Параллельные силы 34
 Паровая машина 241
 Паровая турбина 248
 Паровая рубашка 244
 Паровоз 247
 Паровой котел 236
 — — — арматура 240
 Пары насыщенные 221
 — — — ненасыщенные 223
 Паскаля закон 108
 Перегонка 208
 Перегрев пара 233
 Печи 183
 Пипетка 128
 Плавание тел 141
 Плавление 206
 Плато опыт 154
 Плотность 51
 Пневматические инструменты 135 и след.
 Поверхностное напряжение 152
 Погоды предсказание 123
 Полиэласты 80
 Полная теплота пара 216
 Предел прочности 158
 — — — упругости 157
 Пресс гидравлический 127
 Приближенные вычисления 8
 Пылесосы 180
 Работа 70
 — — — измерение 71
 Равновесие тел 58
 Растяжения деформация 157
 Расширение газов 197
 — — — жидкостей 193
 — — — твердых тел 188
 Регулятор центробежный 67
 Реньо формула 216
 Роса 226
 Рычаги 76
 Сепараторы 68
 Сжатие 159
 Сжатый воздух 132 и след.
 Сжижение газов 228
 Сил графическое изображение 29
 — — — измерение 28
 — — — пара 38
 — — — параллелограм 31
 — — — многоугольника 32
 Сил работа 70
 — — — равновесие 30
 — — — равнодействующая 30 и след.
 Сил разложение 33
 — — — сложение 30
 Сила центробежная 66
 — — — центростремительная 65
 Силы момент 39
 — — — параллельные 34
 — — — плечо 40
 Сифон 127
 Смачивание 154
 Сообщающиеся сосуды 112
 Сохранения энергии закон 103
 — — — вещества закон 24

- Сплавы 217
 Судоподъемники 148
 Судостроение 144
 Температура 195
 — критическая 228
 Тепла количество 163
 — — единица 164
 — — измерения 164
 Теплоемкость 166
 — газов 202
 Тепловой эквивалент работы 175
 Теплопроводность 178
 Теплота кипения 206
 — плавления 206
 — растворения 218
 Термия 164
 Термометр 195
 Термос 185
 Техническая система мер. 99
 Термизмер 92
 Топлива расчет 175
 Торичелли опыт 118
 Тормоз Вестингауза 137
 Торф 259
 Точка росы 226
 Трение 72
 Грибометр 72
 Три состояния тел 23
 Турбина паровая 248
 Угловая скорость 64
 Уголь каменный 257
 Удельный вес 15
 Ускорение 44
 — силы тяжести 50
 Холодильник 931
 — паровой машины 245
 Христиансена прибор 181
 Центр тяжести 55
 Центробежная сила 63
 Центробежная сила 65
 Шестерни
 Эффективная мощность 296
 Экономайзер 235
 Энергия 94
 — кинетическая 94
 — лучистая 102
 — потенциальная 95
 — тепловая 102
 — химическая 102
 Эрг 72

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие к первому изданию	3
Предисловие ко второму изданию	4
Предисловие к третьему изданию	4
Отдел первый. Первоначальные сведения.	
Глава первая. Физика и техника	5
> вторая. Вещество, явления	6
Отдел второй. Механика	
Глава третья. Движение и силы	25
> четвертая. Сложение и разложение сил	30
> пятая. Неравномерное движение	43
> шестая. Центр тяжести и равновесие тел	55
> седьмая. Закон независимости действия сил	60
> восьмая. Вращательное движение	61
> девятая. Работа сил	70
> десятая. Энергия	94
Вопросы и задачи для повторения всего отдела	108
Отдел третий. Жидкости, газы и твердые тела.	
Глава одиннадцатая. Передача давления в жидкостях и газах	106
> двенадцатая. Давление атмосферы	116
> тринадцатая. Применения сжатого воздуха	132
> четырнадцатая. Закон Архимеда	137
> пятнадцатая. Судостроение	144
> шестнадцатая. Воздухоплавание и авиация	147
> семнадцатая. Частичные силы	152
> восемнадцатая. Деформация твердых тел	156
Вопросы и задачи для повторения всего отдела	161
Отдел четвертый. Тепловая энергия.	
Глава девятнадцатая. Измерение тепловой энергии	163
> двадцатая. Передача тепла	178
> двадцать первая. Расширение тел при нагревании	186
> двадцать вторая. Переход тел из одного состояния в другое	205
> двадцать третья. Пары	221
> двадцать четвертая. Тепловые двигатели	232
> двадцать пятая. Грядущая катастрофа отсутствия топлива	257
Вопросы и задачи для повторения всего отдела	259
Ответы и решения задач	262
Предметный указатель	274

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. А. Александров, проф.

ОТКУДА ДОБЫВАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И КАКАЯ ПОЛЬЗА ОТ НЕГО
Книга для чтения на фабр., клубах, избах-читальнях и в школах. Изд. 2-е.
Стр. 142. Ц. 50 к.

В. А. Александров, проф.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ
Конспективный курс применительно к программе рабочих техникумов и курсов
Изд. 6-е
Стр. 128. Ц. 35 к.

А. Я. Бергер, инж.

ОБСЛУЖИВАНИЕ МОТОРОВ
Изд. 3-е. 36 фиг.
Стр. 94. Ц. 30 к.

Э. Козак

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
Перев. с нем. под ред. и в обработке проф. В. А. Александрова
С 57 фиг. Изд. 2-е
Стр. 80. Ц. 30 к.

Э. Казак, инж.

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. МОТОРЫ, ЛАМПЫ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
Изд. 2-е
Стр. 104. Ц. 40 к.

Г. Марек, инж.

ОБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
Изд. 3-е
Стр. 100. Ц. 65 к.

Ф. Раскоп

КАТЕХИЗИС ОБОТЧИКА МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
Перев. с нем. под ред. и в обработке проф. В. А. Александрова
С 65 фиг. изд. 3-е
Стр. 103. Ц. 35 к.

Ч. Читтенден

СХЕМЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ И РОТОРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ПОЯСНЕНИЯМИ И РАСЧЕТАМИ
Под ред. и в обработке проф. В. А. Александрова
Изд. 3-е
Стр. 180. Ц. 75 к.

Н. А. Яблоновский

ТЕЛЕГРАФНЫЙ АППАРАТ БОДДО
Стр. 80. Ц. 1 р. 20 к.

И. Германи, проф.

ТЕХНИКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
Перевод с нем. под ред. проф. Александрова
С 173 фиг. изд. 2-е
Стр. 224. Ц. 35 к.

Д. В. Афанасьев, инж.

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ ФИЗИКИ, ЗАКЛЮЧАЮЩИХ В СЕБЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОСТЕЙШИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Издание 3-е

Допущено в качестве учебника для техникумов

Стр. 104. Ц. 55 к.

Н. Л. Глинка

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Издание 2-е дополн.

В 3-х выпусках

Допущено в качестве пособия для вузов не химической промышленности

Выпуск 2-й

Стр. 145. Ц. 3 вып. 2 р. 50 к.

Л. Е. Левинсон

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Часть 1. Введение. Основные передачи

Издание 3-е. В 3-х выпусках

Допущено в качестве руководства для индустриальн. техникумов

Выпуск 3-й

Стр. 305—464. Ц. за 3 выпуска 3 руб.

А. Реформатский

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Начальный курс

Издание 17-е, стереот.

В 6-ти выпусках

Допущено в качестве учебного пособия для вузов и техникумов

Выпуск 4-й

Стр. 337—432. Ц. за 6 вып. 3 руб.

Ф. Тредвелл, проф.

КУРС АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Том 1. Качественный анализ

Издание 6-е.

Под ред. проф. А. С. Комаровского

В 5 выпусках

Допущено в качестве пособия для вузов

Выпуск 5-й

Стр. 449—552. Ц. за 5 вып. 3 р. 50 к.

ПОКУПАЙТЕ КНИГИ В МАГАЗИНАХ И ОТДЕЛЕНИЯХ КНИГОЦЕНТРА

Учебником не заканчивается изучение предмета

Каждый студент должен быть в курсе того, что нового и интересного происходит в избранной им области и в пограничных областях

Проще и дешевле всего это сделать, выписывая журнал

„НАУЧНОЕ СЛОВО“

являющийся единственным в СССР центральным органом научной информации

Отв. редактор проф. О. Ю. ШМИДТ

„НАУЧНОЕ СЛОВО“ охватывает громадный круг вопросов (естествознание, медицина, техника, общественные науки) и благодаря этому, в отличие от других журналов, дает возможность своим читателям быть в курсе всех достижений современной науки

„НАУЧНОЕ СЛОВО“ знакомит своих читателей с актуальнейшими проблемами науки в ее целом, освещая их с диалектико-материалистической точки зрения и ставит научные вопросы в связь с требованиями практической жизни.

„НАУЧНОЕ СЛОВО“ дает рефераты наиболее интересных статей из советских и иностранных журналов и отзывы о наиболее интересных вновь выходящих книгах.

„НАУЧНОЕ СЛОВО“ систематически освещает деятельность крупнейших научных учреждений СССР (Коммунистической академии, Всесоюзной и Всеукраинской академии наук, научных и научно-технических институтов, Наркомздрава, Наркомпроса, Наркомзема и ВУЗов)

„НАУЧНОЕ СЛОВО“ имеет специальный отдел „организация и гигиена умственного труда“ (статьи, рецензии, заметки).
Выходит 10 номеров в год

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ: на год — 8 р., на 6 мес. — 4 р. Отдельный номер — 1 р.

ПОДПИСКУ НАПРАВЛЯТЬ: Периодсектору Книгоцентра, Ленинград, Пр. 25 Октября, д. 28 или Москва, Ильинка, 3.

Кроме того, подписка принимается: во всех отделениях, магазинах и филиалах и киосках Книгоцентра, уполномоченными, снабженными соответствующими удостоверениями, и всеми почтово-телеграфными учреждениями.