Проф. А. К. ТИМИРЯЗЕВ

ФИЗИКА

Лекции, читанные в Комм. Ун-те
имени Я. М. СВЕРДЛОВА

ЧАСТЬ I-АЯ

ОДОБРЕНО И РЕКОМЕНДОВАНО
ГОСУДАРСТВ. УЧЕНЫМ СОВЕТОМ

ИЗДАНИЕ КОММУНИСТИЧЕСКОГО УН-ТА
ИМ. Я. М. СВЕРДЛОВА МОСКВА—1925

ОТПЕЧАТАНО В РЖЕВСКОЙ ТИПОГРАФИИ
УИК'А В КОЛИЧЕСТВЕ 15.000 ЭКЗЕМПЛЯРОВ
ГЛАВЛИТ—28310.

ИСПРАВЛЕНИЯ.

Стр. 15 первая строка снизу: вместо $a_1 b_1 \; a_2 b_2$ читать $a_1 b_1 = a_2 b_2$

Стр. 47 на рисунке 22 линия BG должна проходить не через 8, а через 9-ое деление

Стр. 48

4-ая строка сверху вместо OB и OA читать CB и CA

8-ая строка сверху вместо $\frac{OB}{OA}$ читать $\frac{CB}{CA}$

на рисунке 23 пропущены буквы.

Стр. 192

12-ая строка сверху вместо $p_0 \frac{2}{273} p_0$ читать $p_0 - \frac{2}{273} p_0$

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящая книга представляет собой запись лекций, читанных автором в период от 1921 по 1924 год в Коммунистическом Университете имени Я. М. Свердлова. Некоторые из лекций составлены по стенограммам. В процессе подготовки этих лекций к печати автор умышленно не делал никаких дополнений с тем, чтобы содержание книги вполне соответствовало тому, что фактически выполнялось за эти истекшие годы. Такого рода „учет" фактической работы, как представляется пишущему эти строки, от времени до времени безусловно необходим, так как все почти без исключения учебные планы и программы—вплоть до вырабатываемых в настоящее время—сильно оторваны от повседневной работы В. У. З. и не соответствуют тому, что фактически выполняется и вообще может быть выполнено, при ограниченном числе отводимых часов и подавляющей нагрузке, взваливаемой на плечи учащегося.

Каждая из лекций, изложенных в настоящей книге, сопровождалась беседой слушателей с лектором и двухчасовой работой в лаборатории (программу лабораторных занятий, согласованных с лекциями, см. Пособие к занятиям по физике. Издательство Комм. Унив. имени Я. М. Свердлова 1924.). В общих чертах программа курса, тщательно согласованная с программой по химии и по биологии, была выработана автором уже осенью 1920 года и принята комиссией, составлявшей первый учебный план двухгодичного курса [1]) Коммунистического Университета и работавшей под руководством тов. В. И. Невского. Последующие многократные пересмотры учебного плана и программ, а главное четырехлетняя практика внесли ряд изменений и поправок, а также довольно существенные сокращения.

[1]) В настоящее время курс трехгодичный.

Курс физики в Коммунистическом Университете должен удовлетворять трем основным требованиям: он должен дать необходимую основу для понимания современной техники; он должен раскрыть диалектику процессов, протекающих в природе, и, наконец, должен дать ряд наглядных и доступных образцов применения научного метода исследования. Осуществить эти требования, хотя бы и только отчасти, возможно одним путем: необходимо выкинуть из программы значительную часть того, что входит в обычные, стереотипные программы элементарных курсов физики, оставив только безусловно необходимое. Наряду с этим некоторые вопросы приходится рассматривать детальнее, чем это обычно принято. Ряд вопросов, требующих применения элементарных познаний в области алгебры и геометрии, выделен оговоркой, что читатель может эти места книги пропустить [1]). Практика, однако, показывает, что даже в самой слабо подготовленной аудитории всегда находится группа слушателей, настойчиво требующая ответа на эти вопросы, и их всегда приходится затрагивать в заключительном слове после беседы, проведенной в аудитории, или в частной беседе после лекции. Поэтому эти более трудные вопросы не были выпущены.

Выпускаемая первая часть курса, охватывая основы механики и учение о тепле в связи с элементами кинетической теории материи, дает фундамент для понимания техники до паровой машины и двигателя внутреннего сгорания включительно. Основа для высших форм техники будет дана во второй части, посвященной учению об электромагнитных процессах. Такое деление соответствует принятому в настоящее время учебному плану коммунистических университетов.

В каждом из разбираемых в курсе вопросов в основу полагаются факты, всем и каждому знакомые из его жизненного опыта, и на этой основе уже развиваются теоретические обобщения.

Автор по двум причинам не пытался приспособлять изложения к тем или другим модным и в то же время по большей части крайне абстрактным методическим схемам: во-первых, втискивание живой науки в абстрактные схемы

[1]) Речь идет о проверке закона всемирного тяготения—стр. 102, об определении размеров земного шара—стр. 91, о законе поднятия жидкостей в капиллярных трубках—стр. 132 и т. п.

чаще всего приводит к тому, что остается одна схема без содержания—т. е. без науки и, во-вторых, потому, что при головокружительной смене методической „моды“ книга уже в процессе писания оказывается устаревшей!

В заключение считаю своим долгом выразить признательность моим товарищам: Н. П. Бене, Д. Д. Галанину, Ю. Г. Гейвишу, Д. И. Сахарову и К. Ф. Теодорчику, сделавшим различные ценные указания после прочтения рукописи настоящей книги и помогавшим мне при подборе чертежей.

А. Тимирязев.

ЛЕКЦИЯ ПЕРВАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Почему изучение физики надо начинать с учения о движении—с механики. Как составляют описания движений. Движение прямолинейное, равномерное и равномерно-ускоренное. Сложение движений. Движение криволинейное.

Товарищи! В той длинной цепи наук, с которыми Вы будете знакомиться в стенах нашего университета, физика занимает безусловно первое место по простоте изучаемых ею явлений, и в то же время, я боюсь, она окажется для Вас на первом же месте по тем трудностям, хлопотам и огорчениям, какими вообще сопровождаются первые шаги—первое знакомство с какой-либо новой наукой. Такая мысль на первый взгляд кажется странной. Почему в самом деле труднее всего оказывается знакомство с простыми вещами — с простыми явлениями? На нескольких примерах, однако, Вы сами легко убедитесь в правильности моих опасений.

Вы все, я думаю, согласитесь с тем, что кипение воды в чайнике, появление иголок льда на лужах под вечер холодного дня, вспыхивание электрической лампочки здесь в аудитории, когда мы поворачиваем ключ—словом, все эти хорошо известные физические явления—неизмеримо проще, чем то, что происходит у человека в мозгу, скажем, у нас с Вами сейчас, в этот момент, когда я говорю, а Вы все слушаете. И вот потому, что физические явления в огромном большинстве случаев—явления простые, и потому, что, несмотря на эту простоту, они играют большую роль в нашей жизни, их удалось подробнее и

полнее изучить—жизненная практика заставила это сделать—а всякий согласится с тем, что изучить что-нибудь, как следует, значит затратить много времени—много труда. Опять, несколько наудачу взятых примеров лучше всего пояснят и эту сторону дела. Астрономы, механики и физики настолько хорошо изучили движение луны, что теперь возможно, на сколько угодно лет, вперед рассчитать, где, в какой день, час, минуту и секунду будет находиться на небе луна; можно вперед рассчитать, когда луна, став между землей и солнцем, бросит на землю тень, можно сказать, в какое место земного шара попадет эта тень, и где, следовательно, будут наблюдать затмение солнца.

Теперь, думаете Вы, легко было выяснить, как надо делать эти рассчеты? Не только целые поколения ученых упорно работали над этой задачей, прежде чем ее решение оказалось столь полным и точным, но и для того, чтобы научиться пользоваться этими вычислениями, чтобы просто научиться понимать их, надо учиться несколько лет! Вот Вам пример, как далеко подвинулись наши познания в области сравнительно простых явлений, как видимое глазу движение, и сколько это потребовало упорного труда. Возьмем теперь другой пример. Больному надо сделать операцию. Ему дают вдыхать пары хлороформа, он засыпает; во время глубокого сна он ничего не чувствует, и операция для него протекает без всякой боли. Во время производства операции надо, однако, все время следить за пульсом больного—это обыкновенно делают помощники врача. Научиться по пульсу распознавать, когда больному становится плохо, не так уж трудно, но за то как эти знания, так и знания врача, приходящего на помощь в случае беды пострадавшему от хлороформа, далеко не полны. Бывают случаи, когда больной, несмотря ни на какие принятые врачем меры, умирает. Предсказать, кто выдержит хлороформирование, а кто нет, заранее бывает исключительно трудно—приходится утешаться, что несчастные случаи бывают не очень часто! Почему здесь невозможно такое же точное предсказание, как в астрономии? Потому, что мы еще недостаточно изучили процессы, протекающие в организме человека, а не могли этого сделать—хотя и очень хотели и хотим—оттого, что явления здесь исключительно сложны. За то те неполные и в то же время в высокой сте-

пени полезные сведения, какими мы располагаем в этой области, приобретать не так уж трудно.

Сходную картину наблюдаем мы и в области общественных наук. Хотя в довоенное время экономисты хорошо умели предсказывать время наступления кризиса, хотя тов. Ленин предсказал, что империалистическая война должна привести к мировой революции, и это предсказание блестяще оправдывается, но, с другой стороны, указать с точностью, когда, в каком году за примером России последует Германия, Польша или Франция, мы при современном состоянии общественных наук не можем. Эту мысль тов. Ленин выразил словами: „Не все народы живут по нашему революционному календарю".

Вот почему науки, изучающие более простые явления, ход которых мы можем с большей или меньшей точностью рассчитывать вперед, как, например, физика, механика, химия и астрономия, называются точными науками; хотя, конечно, и в этих науках остается очень и очень много неизученного, но, по крайней мере, в них есть значительное число вопросов, на которые мы получили уже ясный, недвусмысленный и точный ответ.

Теперь спрашивается, надо ли Вам, ставящим себе задачей в первую голову изучить общественные науки, так много уделять времени изучению естественных наук? Прежде всего всякий, даже поверхностно знакомый с учением Маркса, знает, что все явления общественной жизни в конечном счете определяются развитием производительных сил. А для того, чтобы проследить развитие производительных сил в прошлом, уловить ход этого развития в настоящем и предвидеть дальнейшее течение этого процесса с тем, чтобы иметь возможность не только „об'яснять мир", но и „изменять его", необходимо иметь элементарную „грамотность" в науках о природе. Ведь, в самом деле, законы физики и химии, которыми пользуются инженеры и техники, и без пользования которыми нельзя наладить—не говоря уже об усовершенствованиях — ни одного даже самого простого производства, приходится рассматривать, как составную часть техники, составную часть производительных сил [1]). Наконец, знакомство с методом работы в

[1]) Сказанное не относится к теоретическим построениям и в особенности к выводам, которые делаются на основании теорий в той или другой науке—эта часть составляет вне всякого сомнения „надстройку".

точных науках, знакомство на простых примерах с тем, как в точных науках ставятся задачи, и как их решение доводится до такой степени совершенства, что мы как бы овладеваем явлением, предвидим его течение, предсказываем его наступление, вызываем его по своему желанию, с одной стороны, сообщает навыки, помогающие разбираться в сложных явлениях общественной жизни и, с другой—на конкретных примерах показывает диалектическое превращение необходимости в свободу. Как только мы узнали закон природы, т. е. то, что существует в природе и что происходит с железной необходимостью независимо от наших желаний — мы становимся господами природы—мы получаем возможность направлять процессы, происходящие в природе, в желательном для нас направлении.

Теперь спрашивается, с чего мы начнем изучать физику? На это существует очень избитый и давно всем знакомый ответ: начинать надо всегда с начала! А начало для физики лежит в механике, т. е. в учении о движении. Если Вы возьмете любой учебник физики, то всегда на первых же страницах найдете главу, хотя бы и краткую, в которой речь идет о движении, но очень редко указывается, почему именно изложение физики начинают с учения о движении. А причин для этого очень много. Прежде всего, все явления, изучаемые физиками, даже более того, все наблюдаемые в природе явления сводятся так или иначе к движению того, что мы называем материей. Так, например, то, что мы называем теплом, современная физика об'ясняет движением молекул и атомов, т. е. тех частиц, из которых построена вся материя. Точно также звук, как оказывается, вызывается колебательным движением колокола, струны, голосовых связок человека и т. д. То же самое можно сказать и о свете и о других физических явлениях. Однако, я не буду на этом сейчас останавливаться, так как в этом в значительной степени и будут состоять наши занятия: мы будем знакомиться с новыми и новыми явлениями, на первый взгляд имеющими мало общего с движением, и все-таки, в конце концов, когда мы доберемся до сути дела—мы увидим, что все эти разнообразные явления приводятся к движению.

Но даже и чисто внешним образом физические явления тесно связаны с движением. Если нам надо узнать, холодно

сегодня или тепло, не вдаваясь вообще в решение вопроса, что такое вообще холод или тепло, то мы подходим к термометру и по положению столбика ртути или подкрашенного спирта можем судить, сколько сегодня „градусов" тепла или холода. Следовательно, о температуре мы судим по тому, как перемещается столбик той или другой жидкости. Точно также, если мы хотим узнать, сколько электрической, или правильнее „электро-магнитной", энергии доставляет электрическая станция нашим лампам, мы следим за движением счетчика. Колесо счетчика двигается быстро, когда зажжены все лампы, и медленно, когда горит всего одна лампа. Таким образом, по вращению счетчика производится учет энергии и оплата за пользование электрическим светом. Мы имеем, однако, еще одно очень любопытное доказательство того, что движение есть основное явление, с которым человеку необходимо считаться. Всякий знает, что в обычных условиях звук мы воспринимаем только нашим ухом, а свет—глазом, видимое же движение мы воспринимаем, как не трудно убедиться, не только глазом, но почти всеми нашими органами чувств. Представьте себе, что мы стоим в этой комнате, вдали от окна, а мимо дома проезжает автомобиль, мы его не видим, но по самому звуку, по тому, как он нарастает и затихает, мы можем сказать, быстро он едет или нет, грузовик это или легковой. Значит, мы по слуху можем, хотя бы и грубо, оценить характер движения. Теперь представьте себе, что Вы на санях зимой скатываетесь с горки; можно закрыть глаза и заткнуть уши, и все-таки Вы будете испытывать ощущение, которое часто словами передают: „дух захватывает". По силе этого ощущения мы можем сказать, как быстро мы скатываемся с горы. Наконец, если у нас муха или жук ползет по телу, мы по осязанию узнаем, где он находится и быстро ли он двигается. Словом, почти всеми нашими органами чувств мы воспринимаем движение, а это доказывает, насколько наш организм и организм животных приспособлен для восприятия движения, и насколько важно это восприятие. Во время заметить движение—иногда вопрос жизни и смерти. Представьте себе только положение глухого или слепого человека в Москве на Лубянской площади, где по всем направлениям снуют автомобили и трамваи! В процессе борьбы за существование, в процессе развития органического мира, открытого Дарви-

ном—сохраниться, выжить могли только те организмы, которые хорошо воспринимают движение. Итак, все изложенные сейчас соображения убеждают нас, что физику надо начинать изучать с хорошо доступных нашему восприятию движений.

Как же мы будем изучать движение? Всякое изучение чего бы то ни было начинается с того, что мы учимся давать точное, хотя бы и чисто внешнее, описание того, что находится перед нашими глазами, и чем мы собираемся заниматься. Положим, мы нашли новое растение, которое далеко не все еще видели, мы должны это растение описать так, чтобы по нашему описанию всякий мог бы его узнать. Мы должны указать, какие у него листья, стебли, цветы и т. д. Точно также и в вопросе о движении мы должны научиться находить признаки, по которым можно отличить один вид движения от другого. Чтобы показать, как это надо делать, рассмотрим хорошо всем нам знакомый пример движения железно-дорожного поезда. Пусть поезд идет из Москвы в Орел через Серпухов и Тулу. Мы прежде всего берем карту железных дорог и на карте отыскиваем все эти города, изображенные кружками, и соединяющие их линии, изображающие рельсовый путь, по которому идет наш поезд. Мы сможем узнать расстояние от одного города до другого, если мы бумажкой измерим по карте расстояние от кружка до кружка и посмотрим, в каком „масштабе" начерчена карта, т. е. сколько верст приходится на каждый дюйм или сантиметр карты. Таким образом, карта дает нам внешний вид пути, по которому идет поезд, со всеми изгибами и поворотами, а также позволяет определить длину как всего пути, так и его отдельных участков. Путь, по которому происходит то или другое движение, называется „траэкторией" движения. Кроме того, чтобы определить движение поезда, надо знать еще расписание движения. Из этого расписания мы узнаем, что из Москвы поезд выходит в 12 часов дня, в 2 ч. 35 мин. он приходит в Серпухов, в 2 ч. 43 м. он выходит из Серпухова, в 6 час. 20 мин. приходит в Тулу и т. д. Этими данными движение поезда определено: мы знаем, где находится поезд в тот или другой момент, и сколько верст он прошел к этому времени от Москвы. Правда, из этих данных еще не вытекает ровно никаких указаний относительно того, отчего поезд двигается? Какие условия должны быть выполнены, чтобы поезд вообще мог двигаться? Но пока мы

и не ставили себе эту задачу, мы хотели только научиться отличать одно движение от другого, и этого мы достигли потому, что описание движения всякого другого поезда будет отличаться от данного или расписанием движения или и расписанием и положением железно-дорожного пути на земном

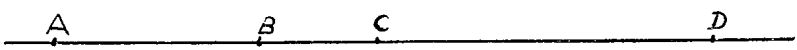


Рис. 1.

шаре, а следовательно, и на карте железных дорог. Итак, для описания движения нам прежде всего надо знать его траекторию, а затем надо составить „расписание движения". Простейшая из траекторий будет прямая линия, такого рода движение носит название прямолинейного. Положим, что по прямолинейному желобу (см. рис. 1) катится полированный шарик M; изображаем на чертеже расположение желоба прямой линией и условимся каждый метр длины желоба изображать на чертеже одним сантиметром: мы устанавливаем, таким образом, масштаб чертежа. Далее нам надо составить расписание движения. Мы должны знать, *когда*, в какой момент шарик находился в A, в B, в C и т. д. (см. рис. 1). Составлять такое расписание все-таки довольно хлопотливо. Для некоторых видов движения, однако, его можно установить очень просто. Предположим, например, что наш шарик катится по желобу „равномерно", т. е. *в каждую секунду пробегает один и тот же путь,* скажем, 10 сантиметров.

Тогда, если мы знаем, откуда началось движение, скажем, из точки A (см. рис. 2), и когда оно началось, мы без труда скажем, где будет находиться шарик через 5, 10, 7,5 секунд: на

Рис. 2.

чертеже эти положения отмечены стрелкой. В самом деле, так как в каждую секунду шарик пробегает 10 сантиметров, то, чтобы узнать пройденный путь, нам надо число секунд,

протекших с начала движения, умножить на десять. Мы получаем 5. 10=50 сант., 10.10=100 сант., 10.7,5=75 сант.

Таким образом, „расписание движения" можно заменить следующей простой алгебраической формулой: S=a. t. (1).

В этой формуле „а" изображает „скорость движения" — в нашем случае это 10 сант. в секунду, т. е. путь, проходимый шариком в 1 секунду—это и называется скоростью движения. Буква t обозначает число секунд, протекшее от начала движения; в нашем примере мы брали 5, 10 и 7, 5 секунд (можно взять какое-угодно число). Буква S обозначает произведение скорости равномерного движения на число секунд, т. е. это будет расстояние, пройденное в t секунд, если „ а", т. е. скорость, показывает путь, пройденный в одну секунду.

Вы видите, что для решения этой простой задачи нам надо измерять длину пути и уметь отсчитывать время. Поэтому нам придется сказать несколько слов об этих измерениях. Я полагаю, что метрическая система Вам известна. Поэтому я ограничусь маленьким замечанием о происхождении этой системы. Принятая теперь единица длины—метр—была установлена во время Великой Французской Революции. В это время было предпринято измерение земного шара. Был измерен меридиан земного шара (см. рис. 3). Четверть „меридиана", т. е. четверть окружности земного шара, разделили на 10 миллионов частей или „метров". Таким образом, если сложить сорок миллионов таких линеек, как та, что Вы видите в моей руке, и сделать такой длины ленту, то эта лента опояшет ровно один раз земной шар. Позднейшие более точные измерения земли показали, что при этом измерении была сделана ошибка, оказалось, что измеренная длина вышла на 856 метров короче действительной. Если разложить эту ошибку на каждый метр, то окажется, что образец метра, изготовленный в конце XVIII столетия, короче одной сорока-миллионной доли земного меридиана на толщину человеческого волоса, немного даже меньше этого! В науч-

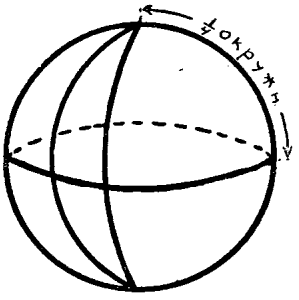


Рис. 3.

ных исследованиях приходится считаться и с такими малыми величинами, но в виду того, что этим метром уж очень много было проделано измерений, решили метр не переделывать, так как и новые измерения земли наверное содержат ошибку, хотя и значительно меньшую, чем 856 метров, так как по мере усовершенствования техники измерения ошибки становятся все меньше и меньше. В науке за единицу длины принимают не метр, а сотую его долю, т. е. сантиметр. За единицу времени принимается секунда, рассчитанная по среднему [1]) солнечному времени. Сутки делятся на 24 часа, час на 60 минут, минута на 60 секунд.

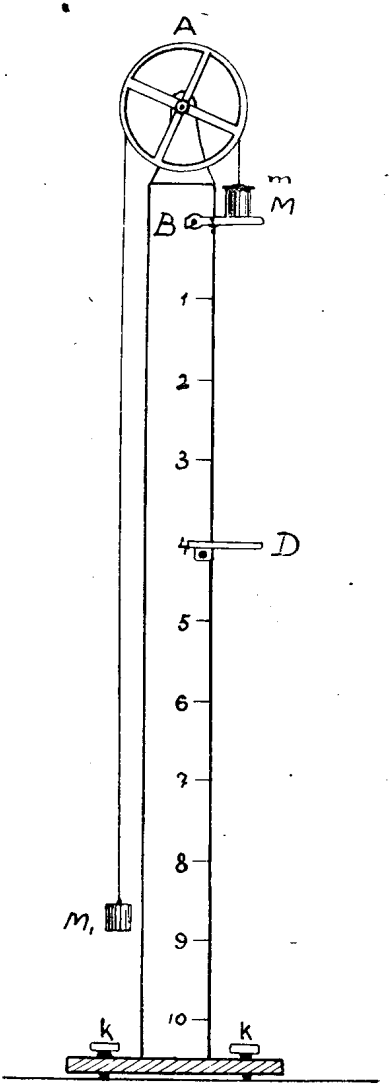


Рис. 4.

Посмотрим теперь, какие еще бывают прямолинейные движения. Вот здесь перед Вами стоит прибор, носящий название атвудовой машины (рис. 4) по имени английского физика Атвуда, построившего его. Этот прибор, как Вы сами видите, состоит из солидной стойки, на которой укреплена большая линейка с крупными делениями. При помощи установочных винтов стойка может быть установлена по отвесу. В верхней части линейки укреплен легко подвижной блок А (см. рис. 4)— это самая существенная часть прибора. Ось блока должна быть хорошо выверена и блок должен вращаться с возможно

[1]) Вследствие неравномерности движения земли вокруг солнца:—в более удаленных от солнца частях пути земля движется медленнее, в более близких—быстрее, солнечные сутки не вполне одинаковы, поэтому за единицу берут среднюю продолжительность солнечных суток.

малым трением. Через блок перекинута нить, на концах которой висят одинаковые грузы M и M_1; так как грузы одинаковы, то ни один из них не перетягивает—они при любом положении (будет ли M выше M_1 или наоборот) будут находиться в равновесии. Теперь мы накладываем на груз M маленький перегрузок m и подпираем груз M подставкой B, стоящей против нулевого деления линейки на самом ее верху, для того, чтобы задержать движение груза M с перегрузком m вдоль по линейке вниз. Эту подставку я могу откинуть, дернув слегка за шнурок. Для того, чтобы удобнее следить за часами, у меня на столе стоит метроном—прибор, громко отбивающий секунды. Я ставлю на первом делении вторую площадку D, и при одном из ударов метронома я отдергиваю верхнюю площадку и говорю вслух „нуль". При следующем ударе я говорю „раз", и Вы видите, что как раз в этот момент груз M с перегрузком m ударился о нижнюю площадку D. Таким образом, у нас так подобран перегрузок m, что под его действием начинается движение, при котором в первую секунду пройденный путь равняется как раз одному делению нашей линейки.

Мы сейчас увидим, что движение грузов на машине, хотя и будет движением прямолинейным—в данном случае—по отвесу, но оно далеко не будет равномерным. Мы сейчас увидим, что во вторую секунду наши грузы пройдут в три раза более длинный путь, т. е. три деления вдоль нашей линейки. Чтобы проверить это, я отставляю нижнюю подставку D еще на три деления, т. е. ставлю на четвертое деление. Ставлю опять груз M с добавочным грузом m на площадку B. Опять при одном из ударов метронома, произнося слово „нуль", я откидываю площадку, и Вы видите, что при втором ударе груз ударяется о площадку D. В третью секунду, как мы сейчас увидим, пройденный путь будет—пять делений. Я отставляю площадку еще на 5 делений вниз и укрепляю ее против 9-го деления линейки. Производим опыт и замечаем, что эти 9 делений проходятся действительно в три секунды, а следовательно, на долю третьей секунды приходится путь в 5 делений.

Таким образом, пути, пройденные в первую, вторую, третью, четвертую и т. д. секунды, составляют одно деление, три, пять, семь и т. д. Т. е. пройденные пути относятся друг

к другу, как нечетные числа 1, 3, 5, 7, 9 и т. д. Движение будет ускоренное: в каждую следующую секунду пройденный путь будет все больше и больше. Теперь посмотрим, как велики будут пути, пройденные от начала движения в одну, в две, в три, четыре и т. д. секунды. Мы видим, что площадка D стояла на первом делении, потом на четвертом, на 9 и т. д. Составим следующую таблицу.

Путь пройден. в одну секунду	= 1 деление		= 1 дел. (1 сек.)
„ „ „ две „	= 1 дел. + 3 дел.		= 4 дел. (2 сек.)
„ „ „ три „	= 1 дел. + 3 дел.	+ 5 дел.	= 9 дел. (3 сек.)
„ „ „ четыре „	= 1 дел. + 3 дел.	+ 5 дел. + 7 дел.	= 16 дел. (4 сек.)

На основании этой таблицы мы можем рассчитать, какой путь будет пройден в любое число секунд. В самом деле, для этого надо, как показывает наша таблица, взять путь, пройденный в первую секунду, и умножить на протекшее число секунд, умноженное само на себя $2 \times 2 = 4$; $3 \times 3 = 9$; $4 \times 4 = 16$ и т. д. Если мы обозначим через t протекшее число секунд, то пройденный путь S выразится так: $S = 1 . t^2$. Вы видите, что деления на нашей линейке очень крупные. Если мы приложим миллиметровую линейку к нашим большим делениям, то, положим, окажется, что на каждое деление приходится b миллиметров, тогда в четырех делениях их окажется 4 b, в девяти—9 b и т. д. Если мы и пройденный путь S выразим в миллиметрах, то нашу формулу надо будет написать

$$S = b\ t^2 \ldots . \quad (2)$$

где, как мы выяснили, S пройденный путь в t секунд, t число секунд, протекшее от начала движения, и b путь, проходимый нашими грузами в первую секунду. Если нам известен путь, пройденный в первую секунду b, и известно число секунд, протекших с момента, когда движение началось, то написанная нами формула (2) в сокращенном виде изображает „расписание" ускоренного движения на атвудовой машине, вызванное перегрузком m. Если мы будем увеличивать или уменьшать добавочный груз m, то от этого изменится путь, пройденный в первую секунду, во вторую, третью и т. д., но самый закон движения останется тот же, т. е. во вторую секунду будет пройден путь в три раза больший, чем в первую, в третью—в пять раз больший и т. д.

Остановимся пока на этих двух примерах и посмотрим, не может ли один и тот же предмет сразу участвовать в двух движениях? Положим, мы на лодке переезжаем через реку; движениями весел мы сообщаем лодке и самим себе движение поперек реки, но течение сносит нас вдоль реки, и поэтому мы фактически переедем реку наискось, потому что мы одновременно подвигаемся и поперек и вдоль.

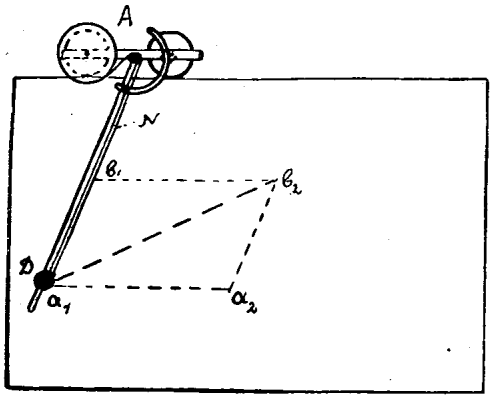


Рис. 5.

Чтобы нагляднее представить себе сложение двух прямолинейных и равномерных движений, рассмотрим следующую модель. По рельсу, расположенному вдоль верхнего края черной доски (см. рис. 5), двигается каретка А, к которой прикреплен стержень; этот стержень можно наклонять под любым углом к направлению движения каретки и закреплять в любом положении винтом. Вдоль стержня скользит груз D с прикрепленным к нему мелком, который чертит на черной доске. Груз D перемещается вдоль стержня благодаря тому, что его тянет нитка N, наматывающаяся на блок, насаженный на ось каретки. Таким образом, движение каретки, передвигающейся вдоль верхнего края доски и переносящей в этом же направлении мелок, заставляет кроме того тот же мелок двигаться вдоль наклонного стержня. У нас на доске мелом отмечено направление $а_1$, $а_2$, по которому двигался бы мелок, если бы он не скользил вдоль стержня и находился все время на его нижнем конце. Отмечено также начальное положение стержня $а_1$, $в_1$, и конечное положение $а_2$ $в_2$ для того момента, когда мелок, двигаясь вдоль стержня, окажется на уровне $в_1$ $в_2$. Продвигая теперь каретку по рельсу, мы замечаем, что при этом сложном движении мелок вдоль доски проходит прямолинейный путь $а_1$ $в_2$. Если мы передвинем в одну секунду каретку со стержнем от $в_1$ к $в_2$, то и мелок в одну же секунду пройдет вдоль стержня путь $а_1$ $в_1 = а_2$ $в_2$ и вдоль

доски путь a_1 $в_2$. Если a_2 $в_2$ и a_1 $в_1$ изображают оба берега реки, а шарик с мелом нашу лодку, то движение стержня изображает движение лодки, вызванное веслами, а движение вдоль стержня—течение реки. Черта a_1 $в_2$ отмечает те места дна реки, над которыми плыла наша лодка, отнесенная течением реки вниз по течению к пристани $в_2$. Итак, мы видим, что, при сложении двух прямолинейных и равномерных движений, получается движение такого же типа, т. е. равномерное и прямолинейное. Но скорость [1]) этого составного движения вовсе не равна сумме скоростей движения каретки и движения мела вдоль стержня. В самом деле, длина $в_1$ $в_2$, которую я сейчас измеряю, прикладывая линейку, равна 25 сантиметрам, длина a_2 $в_2$—22 сант. Длина a_1 $в_2$, т. е. так называемой диагонали параллелограмма (геометрическая фигура a_1 $в_1$ $в_2$ a_2 называется параллелограммом), оказывается равной 40 сантиметрам—это меньше суммы 22+25=47.

Таким образом, если нам даны два движения (прямолинейных) и известны скорости их, то, чтобы найти скорость составного движения, надо построить параллелограмм, причем угол между двумя линиями на чертеже должен быть тот же самый, какой существует в действительности между направлениями действительных движений (a_1 $в_1$ и a_1 a_2). На двух сторонах угла откладывают отрезки (начиная от вершины угла a_1), изображающие в известном масштабе скорости составных движений (о масштабе см. выше о карте железных дорог). Далее мы дополняем чертеж до параллелограмма, проводя линии $в_1$ $в_2$ и a_2 $в_2$ и соединяем a_1 $в_2$ прямой линией—проводим диагональ; измеряем длину диагонали линейкой и, зная масштаб чертежа, находим величину скорости составного движения.

Такой способ нахождения скорости составного движежения называется нахождением геометрической суммы (отрезок a_1 $в_2$) двух отрезков (a_1 a_2 и a_1 $в_1$) или *геометрическим сложением.* К геометрическому сложению приходится прибегать всякий раз, когда мы складываем между собой такие величины, как скорости, которые характеризуются не только числовой величиной (столько-то метров в секунду или верст

[1]) Предполагается, как было выше указано, что каретка путь, равный $в_1$ $в_2$, проходит в течение одной секунды, тогда в течение той же секунды груз Д пройдет вдоль стержня путь a_1 $в_1$ a_2 $в_2$.

в час), но и *направлением*. Сказать: „я от'ехал от Москвы в час на 40 верст" недостаточно, чтобы сказать, где я нахожусь; надо еще добавить, по какой дороге я поехал, надо знать направление движения. Всякая величина, характеризующаяся не только числом, но и направлением, как в нашем примере скорость, называется *вектором* с латинского vector, что значит „везущий", „перевозящий". Мы можем теперь сказать, что векторы надо складывать геометрически так, как складываются скорости—или пользуясь т. н. „правилом параллелограмма".

Посмотрим теперь в заключение, как складывается равномерное движение с ускоренным движением, т. е. с движением такого типа, которое мы наблюдали на машине Атвуда. Пусть на атвудовой машине укреплена длинная горизонтальная трубка, которая опускается вместе с грузом вниз (см. рис. 6), и пусть по этой трубке катится шарик с постоянной скоростью: т. е. пусть он по трубке движется равномерно. Пусть эта трубка движущаяся вниз, как на атвудовой машине, движется вдоль доски, на которой я делаю чертеж. В начале движения трубка занимает положение A_0 B_0—шарик находится в A_0, через секунду трубка займет положение A_1B_1, а шарик вдоль трубки передвинется в B_1;—через две секунды трубка займет положение A_2 B_2—шарик будет в B_2, причем A_2 B_2=удвоенному пути A_1 B_1, пройденному шариком в первую секунду, наконец, через три секунды трубка будет занимать положение A_3 B_3 и шарик будет в B_3. Соединим теперь те места черной доски, против которых находился шарик при своем движении. Вы видите—получается *кривая линия*. Таким образом, сложение прямолинейного и равномерного

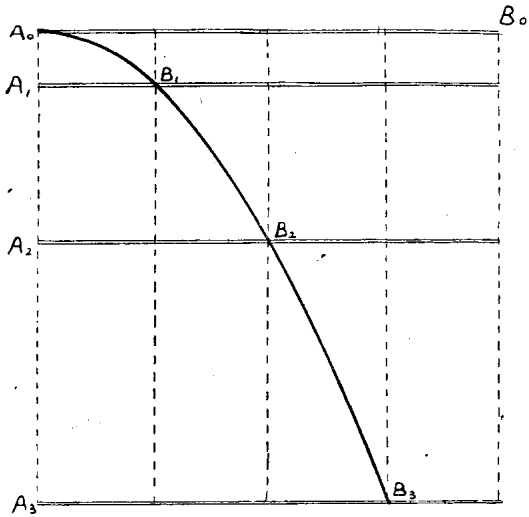


Рис. 6.

движения с движением прямолинейным ускоренным—приводит нас *к новому типу движения—к движению криволинейному*. Кривая линия, которую мы получили, называется „параболой". Наблюдается ли такое движение в природе? Я открываю кран и выпускаю воду из сосуда, стоящего на полочке (см. рис. 7). Вы видите, что вытекающая струя имеет вид параболы. Почему? Вырывающаяся из трубки струя получает от напора воды толчек, под действием которого каждая капелька должна бы лететь равномерно по направлению наконечника трубы, если бы силы тяжести не было, но на каплю действует сила тяжести так же, как и на грузы атвудовой машины, и под действием тяжести капли падают так же, как и грузы на атвудовой машине. Таким образом, здесь вполне сходное явление. По такой же примерно параболе летят артиллерийские снаряды. На следующей модели видно, как можно заранее рассчитать это движение по параболе. В верхней части доски, на которой сделан чертеж, сходный с тем, какой я сделал на доске (см. рис. 8), устроена горка, по которой может скатываться шарик, получающий в конце горки скорость вдоль верхнего края доски. Вдоль вычерченной параболы поставлены кольца. Вы видите, когда я пускаю

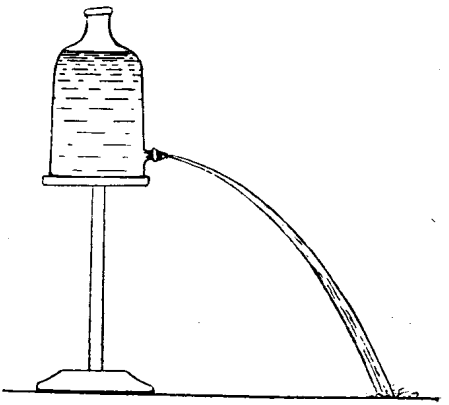


Рис. 7.

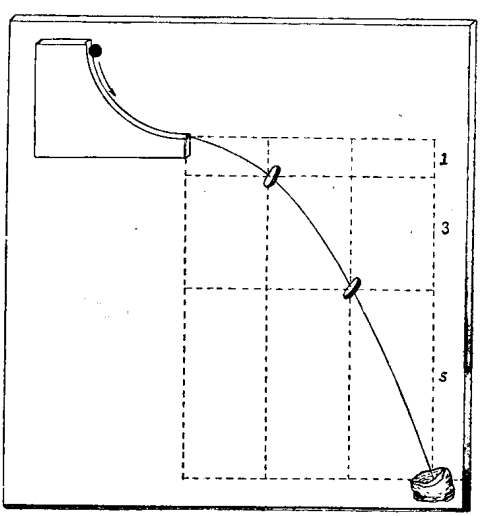


Рис. 8.

шарик с горки, он пролетает как раз сквозь кольца. Эту модель можно сделать каких-угодно размеров, мы в нашей мастерской сделали ее такой, что она свободно умещается на столе. Такая же модель в 1 МГУ настолько велика, что ее надо ставить на пол перед столом, и все-таки и там и здесь шарик пролетает сквозь кольца. Вот вам пример, как „сознанная необходимость" переходит в свободу. Мы ведь сделали пока еще очень немного, мы научились давать чисто внешнее описание движений, не вдаваясь в выяснение того, при каких условиях происходят те или другие движения. Мы подметили закон движения под действием силы тяжести, *изменить* этот закон не *в нашей власти,* но все-таки мы его уже могли *использовать* так, как нам хотелось. Могли построить модель какого угодно размера. Могли начертить параболу каких угодно размеров и, подобрав надлежащей высоты горку, с которой шарик скатывается, заставить его под действием силы тяжести двигаться вдоль этой заранее начерченной кривой. Подобным же способом рассчитывается полет снарядов и определяется заранее место, куда этот снаряд должен попасть.

ЛЕКЦИЯ ВТОРАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Что называется силой? Определение силы по Ньютону. Что называется работой и энергией. Формы энергии и их превращения. Закон сохранения энергии. Как учитывают запасы энергии.

Прошлый раз мы выяснили, как в механике составляют описания движений с тем, чтобы по этим описаниям было легко отличить один вид движения от другого. Мы рассмотрели хотя и немного примеров, но, во всяком случае, выяснили, *как* это делается—выяснили самый метод. Однако, все это еще мало подвигает нас в решении основной задачи механики: мы можем описать любой вид движения, даже весьма тщательно, с помощью алгебраической формулы, и все-таки мы этим еще не решили вопроса, когда именно, при каких условиях наблюдается это описанное нами движение, и что вообще необходимо сделать, чтобы получить движение желаемого вида? Это задача сложная, и сегодня мы ее не сможем еще решить, но за то мы постараемся усвоить себе те предварительные сведения, которые потребуются нам, чтобы как следует взяться за решение этой основной задачи механики, хотя бы и в простейших случаях.

Прежде всего вспомним, что мы делаем, когда мы хотим вызвать какое-либо движение? Мы должны прежде всего сделать усилие или, как принято говорить в механике, приложить силу. Каждый из нас сейчас же вспомнит те усилия, какие ему приходилось делать, когда он приводил в движение санки, груженные дровами, вбивал гвоздь в стену или передвигал стол в своей комнате. Но все вы легко при-

помните, как бесчисленное число раз Вам приходилось с помощью усилия не только вызывать движение, но и тормозить то или другое движение, уже существовавшее. Например, Вы скатываетесь с горы на санях и хотите остановить сани. Вы с усилием упираетесь ногами в снег и тормозите этим движение санок. Наконец, умелым нажимом руки в рукавице или ноги о снег можно изменить направление саней, таким ведь способом и управляют движением саней. Итак, с помощью усилий мы можем вызывать движения, тормозить или изменять существующие движения. Исторически понятие о силе и сложилось, как обобщение трудовых процессов, проделываемых человеком. Нет такого вида труда, где бы не требовалось силы, хотя бы и очень небольшой: без малого усилия даже игла не войдет в сукно. Но, с другой стороны, если мы присмотримся к тому, что происходит вокруг нас в природе, мы на каждом шагу видим, как движения возникают, тормозятся, изменяют свое направление, помимо усилий человека. Ветер гонит парусную лодку и вертит крылья мельницы; тот же ветер тормозит идущего ему навстречу путника с открытым зонтом в дождливый и ветреный день или относит в сторону падающие с дерева сухие листья. Словом, в природе происходит все то, чего человек достигает своими силами или чего он мог бы достигнуть, будь у него побольше силы. В этом смысле мы и говорим—сила ветра или текущей воды, сила пара. В простейших случаях сила и ее действие сводятся к передаче движения от одного тела к другому. Когда мы говорим—мельничное колесо приводится в движение силой падающей воды, то это есть сокращенное выражение факта: движение воды передается мельничному колесу. Но не во всех случаях такая непосредственная передача движения заметна глазу, вот почему практически удобнее говорить о силах, действующих на покоющееся или движущееся тело. Итак, *силой мы называем все то, что вызывает движение в каком-либо предмете и что изменяет какое-либо движение, уже существующее.*

В более точной форме определение силы было дано великим английским физиком Ньютоном. Оно дано им в первой, так называемой, аксиоме механики (аксиомой называется положение, принимаемое без доказательства. Из аксиом делают выводы, которые уже и подлежат опытной про-

верке). Выражается эта аксиома следующим образом: „Всякое тело сохраняет свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку приложенные извне силы не заставят его изменить свое состояние". Таким образом, когда мы видим, что покоившееся тело пришло в движение или двигавшееся равномерно и прямолинейно стало двигаться как-то иначе или, если мы наблюдаем какое-либо неравномерное или криволинейное движение, мы говорим: на тело действуют силы. Если мы заставим двигаться какое-либо тело по гладкой полированной поверхности, например, дадим толчек шару из слоновой кости, лежащему на полированной мраморной горизонтально установленной доске, то шар будет катиться приблизительно равномерно и прямолинейно, и чем лучше отполирован шар и доска, тем меньше будет шар тормозиться, тем меньше движение будет отличаться от равномерного.

Таким образом, мы заключаем, что если бы удалось сделать идеально гладкие поверхности шара и доски, т. е. совершенно устранить тормозящую силу трения, то раз начавшееся прямолинейное и равномерное движение не могло бы прекратиться без постороннего вмешательства. Можно ли сказать наоборот: если какое-либо тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, то на него не действуют никакие силы? Такое заключение было бы поспешным. Здесь на столе, Вы видите, на подставке висят пружинные весы, на крючке весов висит гиря в один килограмм. (Килограмм есть вес чистой воды при 4° Цельсия в об'еме одного кубического дециметра—куба, сторона которого равна дециметру—десятой части метра, т. е. десяти сантиметрам: килограмм=приблизительно двум с половиной фунтам). На крючок весов в этом случае действует, по крайней мере, две силы: сила тяжести или вес гири и сила, с которой растянутая пружина тянет гирю вверх. Так как эти силы одинаковы и направлены в противоположные стороны, то никакого движения не получается: гиря висит неподвижно на вытянутой до первого деления пружине весов. Если я сниму груз и потяну за крючок пальцем так, чтобы пружина вытянулась до первого деления, то я, значит, тяну с силой, равной одному килограмму. Я произвожу пальцем то же самое действие, какое производил груз в один килограмм. Таким образом, можно измерять

какие угодно силы и выражать их в килограммах или каких угодно долях килограмма. Мы говорим, что в подобных случаях силы уравновешивают друг друга. Действие одной силы как раз уничтожает действие другой. Таким образом, у нас на лицо две силы, и все-таки эти силы движения не вызывают. Точно также силы могут уравновешиваться и при равномерном и прямолинейном движении. Так, например, если поезд идет с постоянной скоростью—идет равномерно по прямолинейному пути и по ровному месту, то это значит, что сила тяги паровоза как раз уравновешивает силу трения колес о рельсы и силу сопротивления воздуха, рассекаемого движущимся поездом. Итак, и в состоянии покоя и в состоянии равномерного и прямолинейного движения силы или могут отсутствовать или они должны друг друга уравновешивать. Если силы уравновешены, то они никакого движения, никакого изменения в окружающих нас предметах не производят. Чтобы произвести заметное изменение, сила должна продвинуть тело и притом в том направлении, куда она действует. Положим, я потянул за веревку, привязанную к саням, и протащил их на расстояние нескольких метров. Всякий заметит, что произошло какое-то изменение: сани стояли в одном месте, теперь они стоят в другом. Когда то место, к которому приложено усилие или, как в механике говорят, когда „точка приложения силы" перемещается по направлению, в котором действует сила, мы говорим: сила *произвела работу:* Чем больше сила и чем дальше произошло перемещение, тем больше работа. Так, если цепочку в стенных часах сделать вдвое длиннее и повесить часы вдвое выше на стене, то гиря, опускаясь с вдвое большей высоты, будет вдвое дольше работать, вращая часовой механизм. Я поднимаю (см. рис. 9) лежащую на столе гирю в один килограмм при помощи блока ровно на один метр. Я произвожу при этом работу *в один килограмм-метр.* Эта работа, которую я сейчас произвел, принимается за единицу, за меру

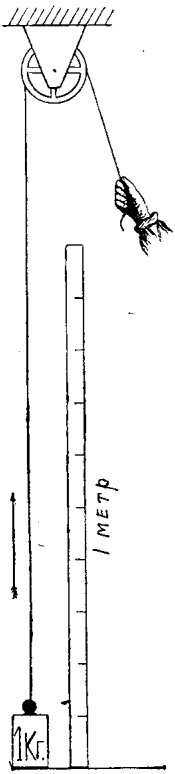


Рис. 9.

всякой работы. Если поднять вдвое больший груз на ту же высоту или тот же груз на вдвое большую высоту, то и работа будет в два раза больше. Итак, *чтобы найти работу, надо величину силы умножить на пройденный путь по направлению действия силы.* Положим, например, нам надо поднять 100 килограмм кирпичей на крышу дома высотой 15 метров; мы знаем, что для этого придется произвести работу в 1500 килограмм-метров, т. е. работу в тысячу пятьсот раз большую, чем та, которую я сейчас произвел. Таким способом можно подсчитать работу, которую производит человек, поднимая кирпичи, ведро воды или, наконец, самого себя на ту или другую высоту. Таким же способом можно под-

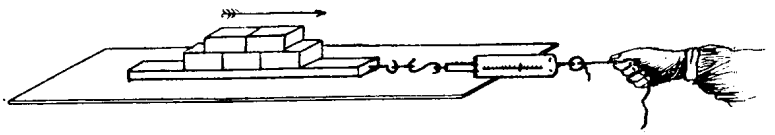


Рис. 10.

считать работу машины, например, землечерпалки, поднимающей со дна реки на берег ил и песок. Но далеко не всегда при производстве работы бывает необходимо поднимать груз; мы можем, например, передвигать всевозможные грузы —ящики по полу, не поднимая их, а всякий по личному опыту знает, что передвинуть ящик легче, чем поднять его и перенести на другое место. Здесь на столе лежит доска, нагруженная кирпичами (см. рис. 10). Если я прицеплю крючок пружинных весов к петле, укрепленной на доске, и буду тянуть за весы, то мы сейчас увидим, что пружина весов вытягивается приблизительно раза в три меньше, чем если бы мы все эти кирпичи и доску подвесили на крючок. Если мы измерим длину пути, вдоль которого мы протащили доску, то мы без труда получим величину работы. Таким образом, кем бы и чем бы ни производилась работа, мы всегда ее измерим, если нам удастся измерить величину силы и длину перемещения. Таким образом, мы можем оценивать и сравнивать между собой работу при любом трудовом процессе человека, а также и работу любой машины.

Когда производится работа, то в ней всегда принимают участие по меньшей мере два тела: то, которое работает, и

то, над которым производится работа: рука человека и поднимаемая ею гиря стенных часов; опускающаяся гиря и механизм часов; ветер, т. е. движущаяся масса воздуха, и крылья мельницы; вода и мельничное колесо и т. д.

Если внимательно следить за какой-либо работой, то мы заметим, что работающее тело постепенно теряет способность к дальнейшей работе, а то, над чем работа производится, приобретает эту способность. Человек, накачивающий воду в бак, стоящий на башне, теряет способность работать, он устает, зато вода, стекая по трубе из бака, может привести в движение маленький двигатель. Поднятая нами гиря часов может, опускаясь, приводить в движение часовой механизм, когда же гиря опустится, на пол, она потеряет способность вращать стрелки часов. Рассмотрим два шара, висящих на нитках. Я отвожу один из них (№ II) (см. рис. 11) в сторону, при этом он поднимается еще выше над уровнем стола: я произвожу работу (если поднять хотя бы и легкий шарик несколько тысяч раз—мы несомненно устанем!) и теряю от этого способность работать, шарик же приобретает способность работать: падая, он ударяет спокойно висевший шар № I и приводит его в движение, а сам останавливается. Поднятый шар № II, над которым я произвел работу, получил способность работать; ударившись о неподвижный шар № I, он заставил его двигаться, но при этом способность работать шара № II исчерпалась—он остановился, зато другой шар приобрел эту способность. Вот эта способность производить работу, которая в процессе работы исчерпывается и передается тому предмету, над которым была произведена работа, называется *энергией*. Итак, энергия есть способность производить работу. Запас энергии измеряется той работой, которую мы произвели над телом и которую это тело может благодаря этому произвести. Я поднимаю гирю часов, весящую $^1/_2$ килограмма, на 2 метра, я произвожу над гирей работу в 1 килограмм-метр. Гиря получила запас

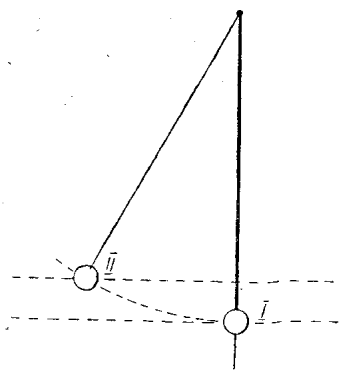


Рис. 11.

энергии, равный одному килограмм-метру; опускаясь на 2 метра, гиря производит работу в один килограмм-метр, производя эту работу над механизмом часов. Истраченная каким-либо телом энергия легко может быть пополнена. Если человек устал от работы, то после отдыха и еды он снова становится способным к работе. Таким образом, пища сообщает человеку запас энергии. Если гиря часового механизма опустилась на пол и перестала двигать стрелки часов, то, подняв ее вновь, человек возвращает ей способность работать, восполняя убыль ее энергии. Из рассмотренных уже случаев видно, что энергия способна принимать различные формы; так, поднятая гиря в часовом механизме обладает тем большим запасом энергии, чем выше мы ее поднимаем над уровнем пола. Эту форму энергии, которая зависит от положения тела, называют *энергией положения или потенциальной энергией.*

Так, например, сжатая или растянутая пружина, натянутая резинка рогатки, туго свернутая „заведенная" пружина обладают энергией положения, так как эта энергия определяется измененным положением частей пружины или резинки. Другая форма энергии—есть энергия движения, или энергия „кинетическая" (от греческого слова „кинема"—движение). Движущийся воздух—ветер, летящая пуля или снаряд, двигающийся шарик слоновой кости обладают способностью работать, обладают энергией только благодаря движению.

В тех случаях, *когда какое-либо тело работает*, оно тратит свою энергию, *запас его энергии исчерпывается*, и, наоборот, *когда над телом производится работа* или, как иначе говорят в механике, когда тело производит „отрицательную" работу, запас его *энергии* увеличивается. Но бывают случаи, когда запас какой-либо формы энергии убывает, и в то же время данное тело не производит работы ни над каким другим телом, в таких случаях энергия не покидает данного тела: она только изменяет свою форму. Возьмем пример маятника. Мы отводим его в сторону и тем самым поднимаем его над уровнем стола. Мы затрачиваем работу—маятник получает избыток потенциальной энергии. Мы его отпускаем—маятник опускается, его потенциальная энергия убывает, но за то он движется все скорее и скорее, его кинетическая энергия возрастает. На примере маятника мы видим,

как один и тот же запас энергии в одном и том же теле может принимать различные формы. Если же спустившийся маятник из слоновой кости и обменявший потенциальную энергию на кинетическую ударится о стоящий на пути другой шар из слоновой кости, то он передает всю свою энергию движения и сам останавливается.

Все приведенные нами сегодня примеры могут служить иллюстрацией одного из самых общих законов природы— закона сохранения энергии. Мы ведь видели, что энергия передается от одного тела к другому и не исчезает. Закон сохранения энергии в том виде, как мы его теперь понимаем, был установлен знаменитым германским физиком Германом Гельмгольтцем в 1847 г. Хотя сам Гельмгольтц в своем сочинении, озаглавленном „О сохранении силы“ [1]), и указывает, что он не сообщает в ней чего-либо нового, что не было известно в науке до него, что ему самому принадлежит только более отчетливая и более общая формулировка закона, частные случаи которого были уже известны, тем не менее высказанные им мысли показались настолько революционными, что его статью отказались напечатать в научных журналах и ему пришлось отпечатать свою работу отдельной брошюрой.

Однако, быть может, многие из Вас готовы мне возразить, что даже в тех случаях, какие мы наблюдали сегодня, энергия все-таки как будто исчезает. Возьмем хотя бы пример с доской и кирпичами, к которой я прицеплял пружинные весы и которую я тащил по столу от одного края его до другого. Я мог измерить в килограмм-метрах работу, какую я производил и, следовательно, определить убыль запаса энергии, которым я располагал. Куда же, спрашивается, ушла эта энергия? Ведь доска с кирпичами, передвинутая на другой конец стола, не приобрела от этого избытка энергии? Наконец, маятник и шары из слоновой кости рано или поздно остановятся. Куда же уходит их энергия?

Когда мы тащили нагруженную кирпичами доску по столу, нам приходилось преодолевать трение доски о поверхность стола, а при этом трущиеся поверхности нагреваются— появляется тепло; плохо смазанная ось при трении в под-

[1]) В то время не была еще установлена терминология и не было еще особого термина для энергии.

шипнике очень сильно нагревается; когда сильным трением колес о тормозные колодки тормозят поезд, то происходит настолько сильное выделение тепла, что появляются искры. Появлением тепла при трении мы пользуемся, когда зимой хотим согреть себе озябшие руки; при очень сильном трении руки об руку маленькие волосы, покрывающие кожу, слегка обгорают, так что от рук даже пахнет паленым волосом. Появление тепла при ударе можно показать на следующем опыте. Кусок свинца С (рис. 12) лежит на замкнутом стеклянном сосуде Е. Внутренность этого сосуда, содержащего воздух, соединяется с коленчатой трубкой АВ; в трубке налита подкрашенная вода. Уровень в обоих коленах стоит на одной и той же высоте ав. Снимаем кусок свинца С, помещаем его на наковальню, ударяем по нему несколько раз молотком и быстро переносим на прежнее место Е. Мы видим, что уровень жидкости в одном колене опустился, в другом поднялся (из а в a_1 и из в в $в_1$). Что произошло здесь? Нагревшийся от ударов свинец нагрел воздух в сосуде Е. Воздух от этого расширился и выдавил подкрашенную воду. Таким образом, перемещение уровней служит нам показателем того, что сосуд нагрелся. Наш прибор носит название „термоскоп", что значит—обнаруживающий тепло. С помощью такого прибора можно наглядно показать в большой аудитории небольшое нагревание или остывание. В большинстве случаев, когда преодолевается очень небольшое трение, трудно бывает заметить нагревание, приходится прибегать к очень чувствительным „термоскопам". Мы увидим, что существуют приборы—электрические термометры или т. н. „термо-элементы", которые позволяют определять миллионные доли градуса, но все это, конечно, существа дела не меняет, стоит только усилить процесс трения, как сейчас же появление тепла станет легко заметным. Таким образом, во всех случаях, когда энергия

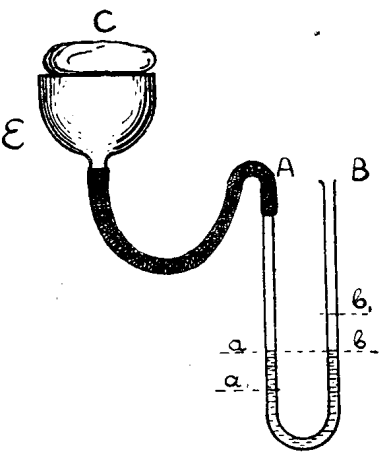


Рис. 12.

как будто исчезает, при движениях, сопровождающихся трением, появляется тепло, но тепло есть также *форма энергии*, тепло есть источник работы. Стоит только вспомнить о паровой машине или о т. н. двигателях внутреннего сгорания, какие ставятся на автомобилях и аэропланах. Ведь во всех этих случаях мы получаем работу за счет того тепла, которое образуется при сгорании топлива в топке котла паровой машины или горючей смеси в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Довольно длинную и сложную цепь превращения энергии можно наблюдать в следующем забавном опыте. Трубочка А (см. рис. 13), наполненная на половину эфиром—жидкостью, закипающей при небольшом нагревании, и плотно закрытая пробкой а, устанавливается на центробежной машине и приводится в быстрое вращение вокруг оси ОО. К боковой поверхности трубки прижимается тормаз Г, имеющий вид щипцов, которые я держу в руке. Вследствие трения щипцов о трубку развивается тепло, эфир разогревается и начинает кипеть, пары эфира выталкивают пробку, и она с шумом летит к потолку. В этом опыте энергия движения руки передается трубке; благодаря торможению, энергия движения превращается в тепло; тепло, вызывая кипение эфира, увеличивает давление пара эфира и вновь превращается в энергию движения вылетевшей пробки.

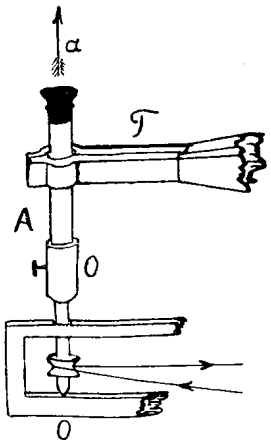


Рис. 13.

Итак, тепло есть форма энергии, которая может превращаться в другие формы. Можем ли мы измерять энергию в форме тепла? Для этого на практике установлена следующая мера. Количество тепла, необходимое для того, чтобы нагреть 1 килограмм воды (около $2^1/_2$ фунтов) на 1 градус по термометру Цельсия, называется большой калорией и принимается за единицу для измерения количеств тепла. У меня имеется термометр Цельсия, у которого деления нанесены на стекле; я при помощи фонаря отбрасываю изображение этих делений и ртутного столбика на стену. Вы видите, что ртутный столбик стоит на 18 делении. Термометр

погружен в воду, находящуюся в т. н. „калориметре"—в латунном сосуде цилиндрической формы. Этот сосуд на пробковых прокладках помещается внутри другого сосуда; сделано это для того, чтобы наш калориметр не так быстро остывал. В калориметр у нас налит ровно один килограмм воды. Я опускаю теперь в воду кусок латуни, который, как Вы видели, нагревался некоторое время на газовой горелке. Вы слышите шипение воды при опускании куска латуни и видите, как постепенно столбик ртути поднимается. Вот он остановился на 24, 5 градусах. Таким образом, один килограмм воды в калориметре нагрелся на 6, 5 градусов. Следовательно, вода в калориметре получила от нагретого куска латуни шесть с половиной больших калорий [1]). Таким образом, Вы видите, как производится самый процесс измерения калорий. Если мы хотим узнать, сколько выделяет один грамм или килограмм того или другого вида топлива при сгорании, то обыкновенно поступают следующим образом: точно отмеренное количество топлива помещают в толстостенный металлический сосуд (калориметрическая бомба); сосуд плотно завинчивают и накачивают кислородом под большим давлением, затем с помощью проводов, введенных в бомбу, вызывают внутри бомбы, после того, как она плотно завинчена и наполнена кислородом, электрическую искру, зажигающую топливо в кислороде. Образчик топлива сгорает в атмосфере кислорода и отдает через стенки бомбы свое тепло воде калориметра. Таким образом, отличие от только что произведенного опыта состоит в том, что в калориметр вместо нагретого куска латуни вносится заранее заготовленная бомба с точно отмеренным куском топлива. Приводим следующую таблицу „калорийности" различных видов топлива.

Таблица 1.

Вид топлива.	Число больших калорий на 1 килограмм топлива.
Донецкий уголь . . .	7000
Бурый подмоск. уголь .	3000
Нефть.	10000—11000

[1]) Малой калорией называется 1/1000 доля большой—это есть количество тепла, требуемое для нагревания одного грамма воды на 1^0 Цельсия.

Вид топлива.	Число больших калорий на 1 килограмм топлива.
Ундорский горюч. сланец (Симбирская губ.)	около 1500
Сухие дрова	3150
Сырые дрова	1900

Из этой таблицы видно, что для получения одного и того же числа калорий требуется различное весовое количество топлива. Так, например, на каждый килограмм нефти потребуется пять с лишним килограмм сырых дров, если мы хотим получить то же самое число калорий. Отсюда ясно, насколько невыгодно перевозить плохие сорта топлива на большие расстояния. Вы видите, таким образом, какое важное значение имеет в народном хозяйстве точное определение количества калорий, выделяемых при процессе горения. В дальнейшем, когда у нас речь будет идти о явлениях тепла и холода, мы узнаем, как можно определить, сколько единиц работы получается, если мы одну калорию переведем в работу. Пока заметим только, что на основании этих измерений установлено, что одна большая калория соответствует 427 килограмм-метрам работы [1]). Кроме того, оказывается, что далеко не все тепло, выделяющееся при сгорании топлива, мы можем перевести в работу. В наиболее усовершенствованных паровых машинах только 18% (восемнадцать сотых частей) всего тепла, получаемого при сгорании топлива в топке котла, используется в качестве полезной работы. Паровозы же дают всего 7%. Таким образом, для расчета количества необходимого топлива требуется определить прежде всего, сколько надо затратить килограмм-метров работы. Разделив это число на 427, найдем число калорий. Если речь идет о паровозе, то найденное количество калорий составляет всего 7 сотых того количества калорий, которое нам потребуется, так как использовать мы можем только эту небольшую долю. И вот, когда мы найдем общее число калорий, тогда с помощью таблицы № 1 мы узнаем, сколько для нас потребуется килограмм того или

[1]) Можно, например, свинцовый груз определенного веса бросить с определенной высоты на свинцовую пластину и оба свинцовых тела поместить в калориметр. Таким образом можно определить сколько калорий получается из данного числа килограмм-метров.

другого вида топлива, чтобы выполнить желаемую работу. В целом ряде вопросов нам бывает важно знать не только общее число килограмм-метров работы, затраченное в каком либо процессе, но и то количество работы, которое производится в определенное время, скажем, в 1 секунду.

Количество работы, производимой в единицу времени, называется „мощностью". *За единицу мощности принимают одну „лошадиную силу" или 75 килограмм-метров в секунду.* Таким образом, если у нас работает двигатель в 10 лошадиных сил, то это значит, что мы от него можем получать в каждую секунду 750 килограмм-метров работы. В электрических установках мощность измеряют килоуаттами, для грубых расчетов мы можем принять, что одна лошадиная сила = $^3/_4$ килоуатта, или 1 килоуатт равен $1^1/_3$ лошадиной силы (точнее 1 лошадиная сила = 0,736 килоуатта).

Эти цифры Вам позволят переводить те данные, которые мы получаем из газет и докладов о развитии нашего народного хозяйства, в более знакомые нам меры—килограмм-метры и лошадиные силы и, кроме того, самим производить простые расчеты. Подобным же образом можно учитывать запасы энергии в водопадах и запруженных реках, т. е. учитывать т. н. „белый" уголь. Для этого надо знать количество килограммов воды, протекающих в каждую секунду, и высоту падения в метрах; произведение числа килограмм на число метров, деленное на 75, даст наибольшее число лошадиных сил, которое мы можем получить, предполагая, что мы используем всю энергию падающей воды. Рассмотренные нами процессы преобразования тепловой энергии в энергию движения или кинетическую происходят в большом масштабе в природе. Нагревшийся вблизи поверхности земли воздух и водяной пар поднимается наверх — от нагревания он расширяется, становится легче и всплывает над более холодными слоями воздуха, на его место притекает более холодный воздух оттуда, где солнце не столь сильно пригрело почву, таким образом возникает ветер, т. е. *движение воздуха, вызванное солнечным теплом.* Далее, водяной пар, сгустившись в тучи, выпадает в виде дождя на горах и возвышенностях и, таким образом, пополняет запасы воды в реках и водопадах. Отсюда ясно, что движение воды в водопаде или реке происходит за счет тепловой энергии солнца. Ведь именно солнечное

тепло поднимает пары воды с земли и образует тучи, из которых на горах идет дождь.

В заключение рассмотрим еще несколько примеров преобразования энергии из одной формы в другую. У меня здесь на столе стоит большая деревянная катушка А (см. рис. 14), обернутая медной проволокой; концы этой проволоки подведены к „гальванометру" G, при помощи которого можно измерять электрический ток. Я вдвигаю стальной магнит NS в катушку, и Вы видите, что стрелка гальванометра отклоняется. Это значит, что по проволоке идет электрический ток. Я выдергиваю магнит—стрелка отклоняется в другую сторону, мы говорим—электрический ток пошел в обратном направлении. Теперь я оставляю в покое магнит и надвигаю на магнит катушку—ток появляется. Если магнит и катушка неподвижны, тока нет. Что здесь происходит? Энергия движения—энергия руки, движущая магнит, переходит в энергию того, что мы называем „электрический ток", а эта энергия, в вою очередь, может опять превращаться в энергию движения. например, замеченное нами движение стрелки гальванометра, Если хоть в одном месте разрезать проволоку, то электрического тока не будет, но тогда вдвигать и выдвигать магнит будет легче: не надо будет тратить энергии на получение тока и движение стрелки гальванометра. На ощупь это „облегчение" при движении заметить нельзя, так как эта „излишняя" затрата энергии на возбуждение тока была в данном случае очень невелика. Но за то подобное явление можно легко продемонстрировать на следующем опыте. У нас имеется здесь (см. рис. 15) машинка „магнето" М, та самая, которую ставят на автомобилях для воспламенения горючей смеси. Эта машина состоит из сильных подковообразных магнитов, между полюса-

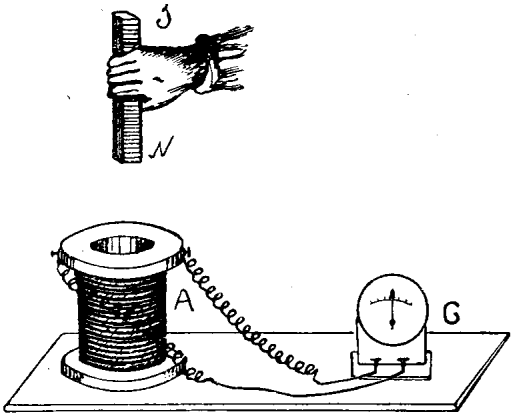


Рис. 14.

ми которых вращается катушка, обмотанная проволокой. Мы ведь видели, что при движении катушки в неподвижном магните ток все-таки получается. Машинка приводится в движение падающим грузом Р, который сматывает веревку с вала, приводящего в движение вращающуюся катушку

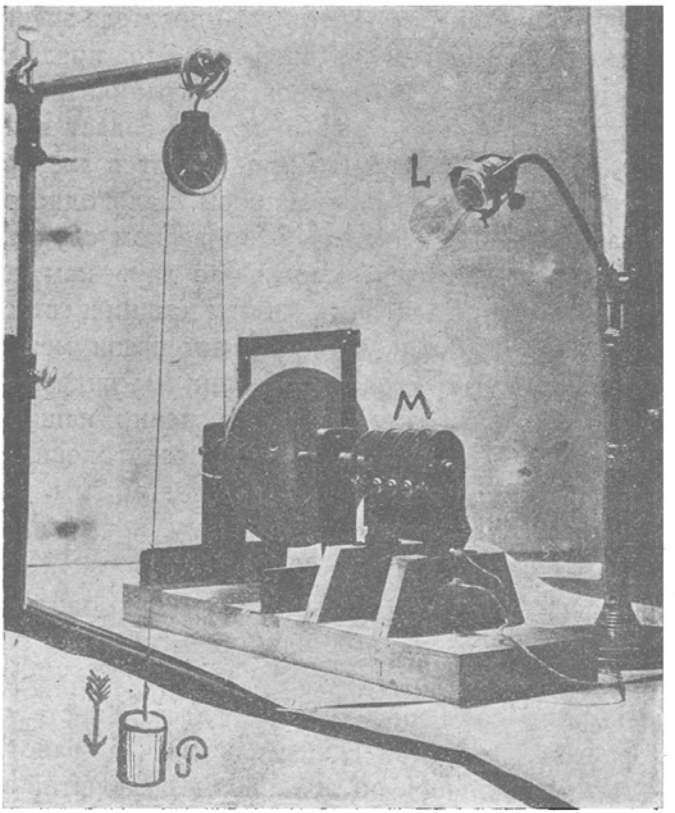


Рис. 15.

(якорь) машины. Если машина работает „холостым“ ходом, т. е. не дает тока—провода разомкнуты, то Вы видите, как быстро падает груз. Если же мы замыкаем ток на лампочку, то, как Вы видите, груз падает медленно, за то у нас горит лампочка. Отчего груз падает медленно? Оттого, что вертеть машинку стало труднее, надо доставлять еще энергию на получение тока для питания лампочки.

Итак, Вы видите, что наши сведения о работе и об энергии позволили нам разбираться в вопросах довольно

таки сложных. Правда, мы только слегка их затрагивали. Мы видели, как получается электрический ток, мы видели, что этот электрический ток несет с собой энергию: может вызвать движение, например, стрелки гальванометра или давать свет и тепло при помощи электрической лампочки. Отсюда мы заключили, основываясь на законе сохранения энергии, что для получения электрического тока—носителя энергии, надо затрачивать, в свою очередь, энергию. Это предположение оправдалось. Но, с другой стороны, ограничиться одними этими сведениями нельзя. Каждый из Вас задаст вопрос, как работает магнето-машинка? Что происходит в электрической лампе? Чтобы ответить на эти вопросы, мало одного уменья подсчитывать запасы энергии. Но, во всяком случае, учение об энергии дает нам очень много: оно дает нам не только необходимые сведения для учета работы машин и естественных источников энергии, но и устанавливает связи между, казалось бы, разнородными явлениями, как мы видели сегодня. Мы находим то общее, что есть в движении нашей руки и электрическом токе, химическом процессе горения топлива и работе паровой машины и т. д. Словом, мы научаемся находить общее там, где поверхностному наблюдателю бросаются в глаза одни только отличия.

Я предвижу, однако, с Вашей стороны одно возражение: „Почему Вы ничего не говорили об умственной работе—о нервной энергии и т. д.?".

Вне всякого сомнения, мозговая деятельность человека требует расхода энергии, как и физическая работа. Этот расход—очень небольшой по сравнению с затратой на физическую работу—пополняется за счет запасов энергии в пище. Но как эта умственная работа происходит? В чем она состоит? Каков механизм, осуществляющий эту работу? Все это еще нам пока неизвестно. Мы пока еще не умеем определить, сколько килограмм-метров работы требуется для решения той или иной арифметической задачи. Вот в силу нашего неумения подойти к решению этих сложных задач, мы очень часто употребляем слово энергия в применении к мозговой деятельности человека совсем не в том смысле, как мы это делали сегодня и как это делают вообще в науке. На эту сторону дела особенно любил обращать внимание Людвиг Больцманн, один из крупнейших физиков XIX столетия.

Вот один из примеров, приводимых Больцманном. Перед нами талантливый организатор крупного предприятия, где идет коллективный труд многих и многих людей; он мало говорит, делает короткие указания и одним своим бодрым веселым видом побуждает всех взяться за дело, как следует: работа кипит. При этом наш руководитель тратит ничтожное количество энергии. А вот перед нами другой тип неудачника—неврастеника, у которого у самого из рук все валится. Он на всех сердится, кричит, произносит громовые речи и угрозы, а его никто не слушает и украдкой все смеются. Хотя дело и не подвигается вперед, а „руководитель" обливается потом и тратит громадные количества энергии. Теперь спрашивается, кто из них больше истратил энергии и кого в житейском смысле мы назовем энергичным?

Этот пример ясно показывает, что мы на каждом шагу применяем слово энергия, энергичный в разных смыслах. В науке энергией, как мы видели сегодня, называется способность производить работу, а работа измеряется произведением силы на путь, пройденный точкой приложения этой силы в направлении ее действия. Если мы постоянно будем помнить это определение, которое многим из Вас покажется несколько будничным и недостаточно общим, то мы, по крайней мере, не запутаемся в противоречиях, как это на каждом шагу случается, когда люди, незнакомые с физикой, с уверенностью говорят об энергии, не отдавая себе отчета, что они собственно разумеют под этим словом.

ЛЕКЦИЯ ТРЕТЬЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

При каких условиях силы не вызывают движения. Простые примеры на равновесие. Параллелограмм сил. Общий закон равновесия—принцип Лагранжа.

Те соображения о работе и энергии, которые мы разбирали на прошлой лекции, окажутся нам сегодня очень полезными при попытке установить так называемые общие „условия равновесия". Мы ведь видели, что бывают случаи, когда на какое-нибудь тело, скажем, на груз, висящий на крючке пружинных весов, действуют силы (в данном случае сила тяжести или вес груза и упругая сила растянутой пружины), и все-таки в результате совместного действия этих сил никакого движения не происходит. В то же время мы знаем, что в отдельности и растянутая пружина, как и растянутая резина на рогатке, могут служить источником движения, и сила тяжести, в свою очередь, если она действует беспрепятственно, вызывает движение. Для нас важно решить вопрос, когда силы вызывают движение и когда они никакого движения не вызывают,— когда они „уравновешены". В простейших случаях вопрос решается без труда. Мы об'ясняем равновесие груза на пружинных весах тем, что груз находится под действием двух равных и противоположно направленных сил, а всякий из личного опыта знает, что если мы будем тянуть груз с одинаковой силой по двум противоположным направлениям, то он остается на месте. Если же силы действуют в одну и ту же сторону, то действия их складываются, и у нас полу-

чается движение и движение более заметное, с большей скоростью, чем если бы силы действовали порознь. Но как будет происходить дело, если мы к ящику привяжем три или четыре веревки и начнем его тянуть в разные стороны? Всегда ли мы получим движение или и здесь силы при некоторых условиях взаимно уравновесятся? Разберем следую-

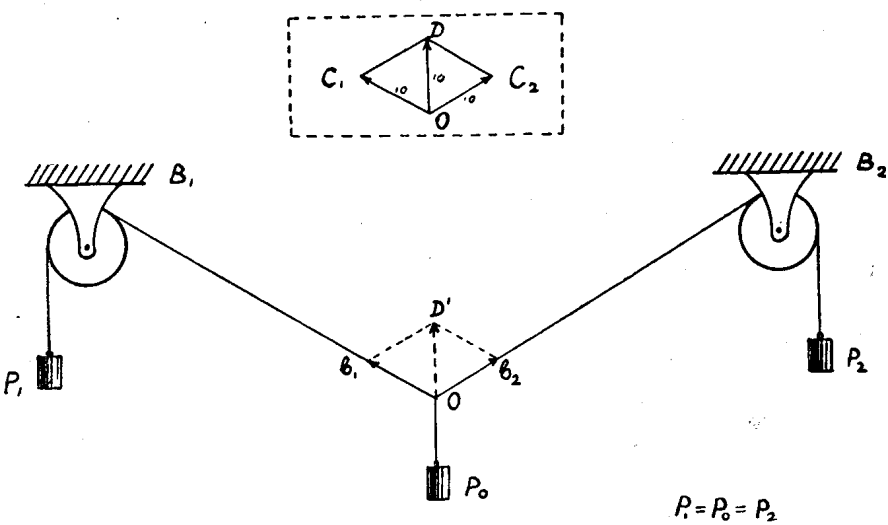


Рис. 16.

щий простой пример: на нашей черной доске укреплены два блока B_1 и B_2 (рис. 16). Через эти блоки перекинута нить; на концах ее и по самой средине висят одинаковые грузы P_1, P_0, P_2. Мы можем сказать, что на узелок нити О действуют три силы—P_0 по отвесу вниз и две другие P_1 и P_2 вдоль нитей Ob_1 и Ob_2. Вы видите, что грузы висят неподвижно, следовательно, наша система, состоящая из нитки и трех грузов, находится в равновесии. Посмотрим, что для этого должно быть выполнено. Из сказанного ясно, что сила характеризуется не только числовым значением—один килограмм, сто килограмм и т. д., но и направлением, т. е. сила представляет собой т. н. „вектор" (см. 1 лекцию), а векторы складываются по правилу параллелограмма, мы это видели на примере скоростей. Попробуем сложить две силы равной величины, действующие по направлению Ob_1 и Ob_2. У нас здесь

на бумаге, которую мы подкладываем под нитки (см. рис. 16), проведены две прямые линии, как раз под тем углом, какой образуют нитки Ob_1 и Ob_2. На этих линиях отложим равные отрезки по 10 сантиметров OC_1 и OC_2, дополним чертеж до параллелограмма DC_1 DC_2 и проведем диагональ OD. Если приложить к этой диагонали линейку, то, как мы видим, ее длина равна 10 сантиметрам. Далее, если мы бумагу с начерченным параллелограммом приложим таким образом,

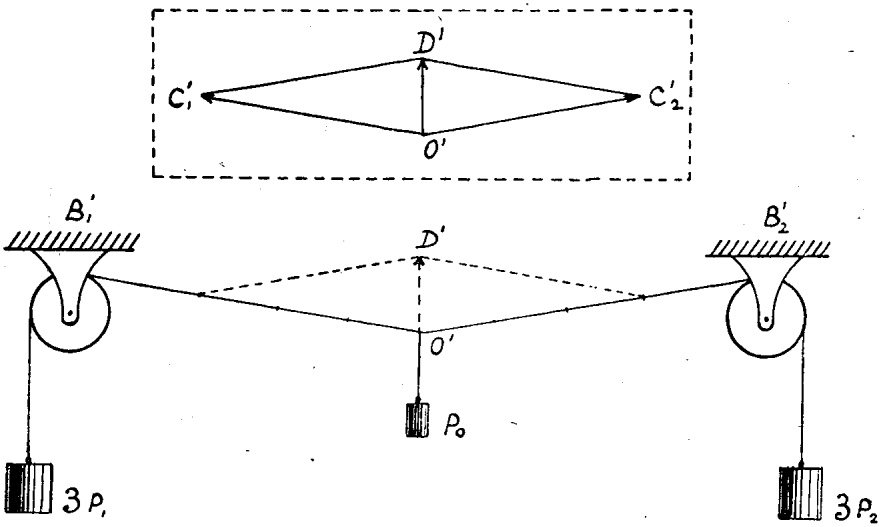


Рис. 17. $P_1 = P_0 = P_2$

чтобы нитки Ob_1 и Ob_2 совпали со сторонами OC_1 и OC_2, тогда диагональ OD составит продолжение отвеса OP_0. Так как длина диагонали получилась равной сторонам OC_1 и OC_2, то, следовательно, „геометрическая" сумма (см. 1 лекцию) OD отрезков OC_1 и OC_2 по числовой величине равна OC_1 и OC_2, т. е. весу любого из грузов P_1, P_2 или P_0. Теперь ясно, что если мы заменим действие сил P_1 и P_2 одной „равнодействующей" OD^1, то равновесие не нарушается, потому что тогда у нас останется две силы OD^1 и P_0, которые равны и направлены в противоположные стороны. Мы, следовательно, доказали, что в этом случае будет равновесие. Обратно, силу OD мы могли бы заменить силами OC_1 и OC_2, если бы,

скажем, P_0 висел на пружине и OD изображало бы силу, с которой пружина тянет груз вверх. Таким образом, можно одну силу OD разложить на две OC_1 и OC_2, причем действие этих двух сил, как видно, будет такое же, как и силы OD. Но мы сейчас увидим, что одну силу можно заменить двумя силами, самыми разнообразными способами. Сделаем следующий опыт: оставляя груз P_0, увеличим груз P_1 и P_2 в три раза (см. рис. 17); мы видим, как нитка вытягивается, направления $O^1 B^1_1$ и $O^1 B^1_2$ образуют между собой больший угол, чем Ob_1 и Ob_2 (см. рис. 16). Пододвигая заготовленный чертеж: параллелограмм со сторонами, совпадающими с направлениями $O^1 B^1_1$ и $O^1 B^1_2$, и со сторонами $O^1 C^1_1$ и $O^1 C^1_2$, в три раза большими, чем OC_1 и OC_2, мы замечаем, что величина диагонали OD^1 осталась та же и направлена она будет по отвесу в том случае, когда $O^1 C^1_1$ и $O^1 C^1_2$ совпадут с $O^1 B^1_1$ и $O^1 B^1_2$, следовательно, и в этом случае действие двух сил $3P_1$ и $3P_2$ такое же, как и действие силы O^1D^1, только в данном случае силы образуют между собой более тупой угол. Итак, мы на опыте убеждаемся, что две силы, действующие под углом друг к другу на одно и то же место, или, как говорят в механике, две силы, приложенные в одной точке, можно заменить одной равнодействующей, сложив две данные силы по правилу параллелограмма и рассчитав на чертеже величину и направление этой равнодействующей. Отсюда мы выводим правило, как заранее узнать, будут ли в равновесии данные силы или нет. Надо составить чертеж, изобразив силы отрезками, пропорциональными их величинам, т. е. силу в два раза большую надо и изображать в два раза бо́льшим отрезком и т. д., а направление отрезков, изображающих силы, должно совпадать с направлением действия самых сил, затем надо попарно складывать их, пользуясь правилом параллелограмма. Если мы в результате этого сложения получим две силы равные и противоположные, то у нас равновесие будет на лицо. Посмотрим, какие практические выводы можно сделать из того, что мы выяснили. Груз, висевший на нитке, может служить моделью фонаря, подвешенного на проволоке, грузы, висящие на концах, изображают натяжение проволоки, на которой висит фонарь. Вы видите на втором опыте, что натяжение проволоки может быть во много раз больше веса того фонаря,

который на ней висит, и это натяжение будет тем больше, чем меньше „провисает" фонарь. Отсюда следует, что надо с осторожностью натягивать проволоку или веревку, если на ней подвешен какой-нибудь груз. В процессе натягивания проволока может разорваться. Явление „провисания" мы наблюдаем и в том случае, когда к проволоке совсем ничего не подвешивается, и она будет провисать под влиянием своего собственного веса. При проводке телеграфных и телефонных проволок приходится выбирать некоторую „средину": если очень сильно натянуть проволоки, то при малейшей перегрузке, при налипании снега или льда зимой они легко могут лопнуть; если давать им свободно „провисать", то для проводки потребуется значительно больше проволоки. Что проволоки действительно провисают—это мог заметить всякий, кому случалось ехать по железной дороге. Если сидеть неподвижно в вагоне и смотреть в окно на телеграфные проволоки, то нам кажется, что они в промежутках между столбами опускаются и поднимаются по мере приближения к столбу. Поэтому, глядя в окно на проволоки, можно вперед сказать, когда столб появится в окне.

Рассмотрим теперь следующий случай: пусть на подводу высотою в 1 метр положены две слеги, длиною в 10 метров, по которым будут вкатывать бочку. (Числа взяты нами для удобства расчета). Посмотрим, какую силу надо приложить к бочке весом в 100 килограмм (около 6 пудов), чтобы поддержать ее на наклоненных слегах. Мы можем вес бочки OP_0 (см. рис. 18) разложить на две силы OP_1 и OP_2, причем за направление сил мы выберем направление вдоль слеги BA и под прямым углом к ней. Сила OP_2, направленная под прямым углом к слегам, может прогнуть их, если они недостаточно толсты, но, во всяком случае, двигать вдоль слеги эта сила не будет, она всего только прижимает бочку к слегам. Сила же OP_1 будет стремиться двигать бочку вниз—заставлять ее скатываться. Поэтому, чтобы удержать бочку, не требуется силы, равной ее весу: для этого достаточно иметь в распоряжении силу OP_1, направленную в противоположную OP^1_1 сторону, т. е. направленную вверх вдоль „наклонной" плоскости, в которой расположены слеги. Знакомые с геометрией—с теорией подобных треугольников без труда сообразят, что сила $OP^1_1 = OP_1$ во столько раз

меньше веса бочки OP_0, во сколько высота подводы CB меньше длины наших слег. В данном случае AB в 10 раз больше CB. Поэтому сила $OP^1_1 = OP_1$ в 10 раз меньше веса бочки, т. е. равна 10 килограммам (вес бочки=100 килограмм). То, что доказывается в геометрии, может быть доказано на опыте с моделью наклонной плоскости путем измерения ее длины AB и высоты BC и, с другой стороны, путем уравновешивания груза, находящегося на наклонной плоскости, противовесом, висящим на нитке, перекинутой через блок, укрепленный наверху наклонной плоскости (такого рода упражнение предлагается на практических занятиях). Необходимо еще отметить, что в нашем расчете мы не учитывали силы трения, тормозящей движение вдоль наклонной плоскости. Итак, в нашем примере мы можем поддержать бочку в 100 килограмм (около 6 пудов) силой в 10 килограмм (около 24 фунтов). Ясно, что это можно сделать одной рукой. Если мы приложим еще добавочную силу, чтобы преодолеть трение (сила трения, когда предмет катится, как в данном случае, очень невелика), то бочку можно без труда вкатить наверх. Теперь спрашивается, имеем ли мы какой-либо выигрыш в работе при пользовании наклонной плоскостью? Мы сейчас увидим, что ровно никакого. Чтобы поднять бочку вдоль BC на 1 метр (по отвесу), надо затратить $100 \times 1 = 100$ килограмм - метров. Чтобы вкатить бочку (отвлекаясь от силы трения), нужна сила всего в 10 килограмм, а это даст $10 \times 10 = 100$, те же сто килограмм-метров. Что мы выигрываем в силе, то мы проигрываем в расстоянии или, что то же, в скорости производства работы. Найденный нами результат составляет частный случай того, что в старину называли „золотым правилом механики". Теперь мы рассматриваем это правило, как частный случай закона сохранения энергии. Так как, если бы работа при вкатывании была бы меньше, чем работа при непосредственном поднятии груза, то мы могли бы при падении груза получать больше работы, чем

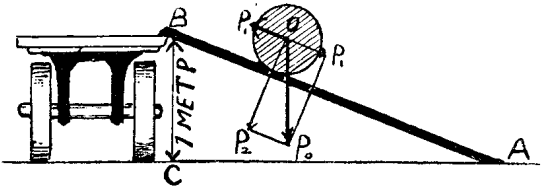


Рис. 18.

затрачивалось бы при под'еме вдоль наклонной плоскости. При „заводке" машины мы тратили бы меньше энергии, чем получали от нее во время использования „завода". Величину силы при вкатывании бочки можно еще уменьшить вдвое и опять, понятно, за счет продолжительности работы. Представим себе, что мы к подводе привязали веревку, перекинули ее через бочку и, потянув за веревку, вкатываем бочку наверх (см. рис. 18а). Пусть отношение длины плоскости к ее высоте остается прежнее (десять к одному). Ясно, что потребная для поддержания бочки на наклонной плоскости сила в 10 килограмм распределяется поровну на оба конца веревки, но ведь мы держим только один конец в руках. Поэтому на долю вкатывающего бочку человека теперь приходится всего 5 килограмм. Если бочка лежит у нижнего конца наклонной плоскости, то длина двух концов веревки в сумме будет 20 метров. Все эти 20 метров при вкатывании бочки надо вытянуть из-под бочки. Поэтому произведенная работа будет $20 \times 5 = 100$, т. е. опять те же 100 килограмм-метров. Таким образом, вся выгода сводится к тому, что работа распределяется на большее время. Уменьшается „мощность", т. е. работа, производимая в единицу времени. А человеческий организм выдерживает много легче и без вреда для здоровья более продолжительную работу, проявляя при этом малую мощность, чем работая краткий срок, но за то с большим напряжением. Кроме того, мы приходим к очень важному выводу: производит работу та составляющая часть силы, которая направлена в сторону перемещения, та же составляющая, которая образует прямой угол с направлением перемещения, в работе не участвует. Прежде, чем перейти к изучению общих условий равновесия, рассмотрим еще один простой пример. Пусть через блок перекинута нитка, на концах которой висят одинаковые грузы. Вся наша „система", состоящая из блока, грузов и нитки, будет в равновесии.

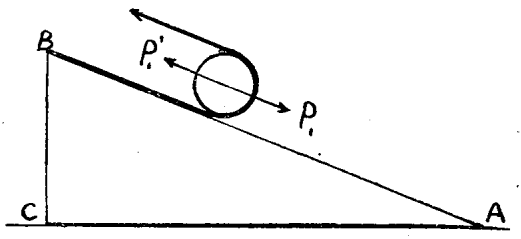


Рис. 18а.

Положим, что мы передвинули груз I (см. рис. 19) из положения A в положение A_1, груз II при этом поднялся из положения B в положение B_1. Ясно, что энергия положения груза I уменьшилась на столько же, на сколько увеличилась энергия груза II. Раз энергия в итоге не изменилась, то эти оба груза не могли произвести работы. Действительно, точка приложения силы тяжести груза II прошла путь A вниз, т. е. по направлению силы тяжести и, следовательно, произвела работу P_0A, для груза же I перемещение происходило против направления силы тяжести, поэтому мы работу считаем со знаком минус:—P_0A. В результате работа во всей системе будет $P_0A—P_0A=O$. Так и должно быть, так как энергия всей системы не изменилась, следовательно, эта энергия ни на что не тратилась и не могла произвести работы. Итак, мы будем теперь всегда считать работу с + или с —, смотря по тому, совпадает ли направление перемещения с направлением силы, или перемещение происходит в противоположную сторону.

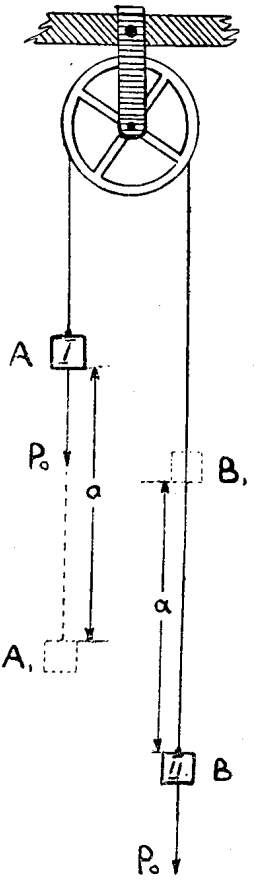


Рис. 19.

Рассмотрим теперь две модели. На первой из них (рис. 20) мы имеем неподвижный блок A и подвижной B, висящий на двух концах нити, одной—a, укрепленной на подставке, и другой—в, перекинутой через неподвижный блок A. К блоку B на крючке укреплен груз G, вдвое более тяжелый, чем P, висящий на свободном конце нитки c, на котором находится еще противовес для блока B, и все-таки у нас имеет место равновесие. В рассматриваемой модели возможно перемещение груза G вниз и P наверх или обратно—груза G наверх и P вниз, такого рода перемещение носит название „двухстороннего". Кроме того, перемещения как в ту, так и в другую сторону мы условимся называть „возможными", потому что при этом модель не разрушается—остается целой. Посмотрим, как велика будет работа уравновешивающихся

сил P и G при этих возможных и двухсторонних перемещениях. Положим, груз P=50 грамм=0,05 кг. опустился на 10 сантиметров=0,1 m, тогда груз G=100 грамм=0,1 кг. должен подняться на 0,05 m, т. е. на половинную высоту: выдергивая конец с на 10 см. из под блока B, мы укорачиваем a и b поровну, таким образом, блок B поднимается на 5 сантим. или на 0,05 m. В первом случае работу надо брать с+, во втором — с —. Произведем подсчет: работа силы P будет+0,05 кг ×0,1 m=+0,005 килограмм-метра. Работа силы G будет 0,1 кг ×0,05m=—0,005 килограмм-метра. Итак, в сумме работа равна 0: один груз производит работу,— над другим грузом производится такая же работа. Один груз приобретает энергию положения, другой — теряет такое же количество энергии положения. При этом необходимо помнить, что подсчитывать работу надо только для тех сил, которые давали равновесие; силу нашей руки, временно нарушающую равновесие и производящую „возможное" перемещение, считать не надо, так как при ее действии равновесия не будет. Рассмотрим теперь вторую модель. Груз G (см. рис. 20а), привязанный к нити a, лежит на доске, на другом конце нити, перекинутой через блок A, висит груз меньшего веса P. В этом случае возможное перемещение будет только одностороннее: я могу поднимать груз G, опускать его нельзя, не проламывая доски, на которой он стоит, но такое перемещение мы не считаем „возможным", раз при этом наша система, хотя бы и в одной своей части, разрушается. Когда мы опускаем груз P на расстояние b и при этом поднимаем груз G на ту же высоту b, то положительная работа силы P, совпадающей с направлением перемещения, будет меньше отрицательной работы силы G, направленной в сторону, противоположную перемещению. Таким образом, при возможном

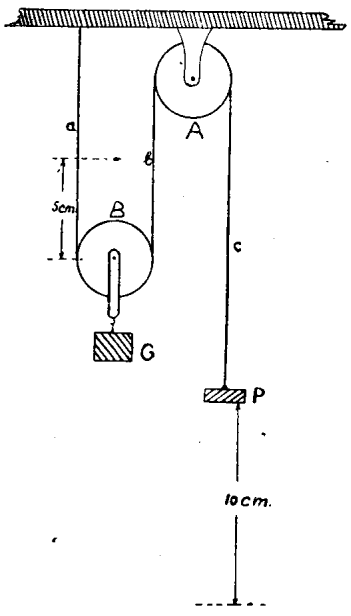


Рис. 20.

одностороннем перемещении работа уравновешивающих сил может быть и отрицательной, причем равновесие все-таки будет иметь место. Конечно, равновесие и для одностороннего перемещения будет иметь место и при равенстве грузов, но тогда подставка не будет уже играть никакой роли.

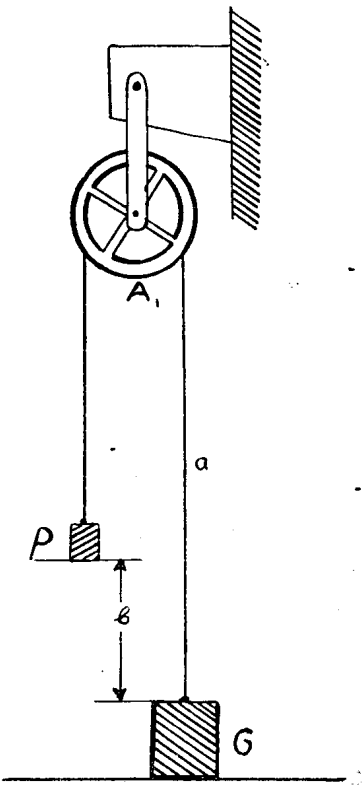


Рис. 20а.

Знаменитый французский математик Лагранж (родился в 1736 г., умер—1813) показал, что все случаи равновесия подводятся под один из двух рассмотренных нами примеров. Возможные перемещения могут быть или двухсторонние или односторонние, и только. Поэтому Лагранж предлагает следующие правила для определения равновесия. *В случае равновесия при всяком возможном двухстороннем перемещении работа всех действующих сил должна в сумме равняться нулю. При одностороннем же перемещении, в случае равновесия, сумма работ действующих сил может равняться или нулю или может быть отрицательной величиной.* Что это правило имеет всеобщее значение, т. е. что оно позволяет в самых сложных и запутанных случаях показать, будет ли иметь место равновесие или нет, Лагранж доказал с помощью математики. Мы же с Вами пока убедились в правильности положения Лагранжа на двух примерах, в дальнейшем мы будем пользоваться безоговорочно этим правилом и каждый раз будем наблюдать, выполняется ли оно на деле или нет. Так как мы в очень многих случаях будем иметь возможность его проверить, то такой способ проверки нам с успехом заменит математическое доказательство Лагранжа. Прежде всего попытаемся сейчас же на одном довольно сложном примере показать, насколько легко применять правило Лагранжа, и как быстро оно приводит нас к решению

задачи. Вот здесь у меня, на этой солидной подставке (см. рис. 21), висит т. н. сложный блок, состоящий из двух неподвижных и двух подвижных обыкновенных блоков. Как видно (см. рис. 21), груз G, висящий на подвижных блоках, значительно тяжелее груза P, висящего на свободном конце веревки (5). Ясно, что, при вытягивании веревки (5) на 20 сантиметров, каждый из четырех концов (1), (2), (3) и (4) укоротится на четвертую часть, т. е. на 5 сантиметров и, следовательно, груз G поднимается на 5 сантиметров, в то время, как P опустится на 20. Во сколько же раз груз G должен быть тяжелее P? Некоторые из товарищей уже мне подсказывают: „в четыре раза". Действительно, если $G=4P$, то работы сил P и G будут: $P\times20-4P\times5=0$, т. е. в сумме получается нуль, так как по нашему условию работу опускающегося груза надо считать с+, а поднимающегося с—. Перемещение у нас было двухстороннее, так как грузы G и P могут опускаться и подниматься. Итак, этот пример убеждает нас, как удобно пользоваться правилом Лагранжа для отыскания условий равновесия. Прежде, чем разбирать дальше приложения правила Лагранжа, остановимся на самой его формулировке. Эта формулировка, как нельзя лучше, отражает диалектические процессы, происходящие как в природе, которую мы изучаем, так и их отражение в нас самих—в нашем мозгу. Мы ставим себе вопрос, будет ли в том или другом случае

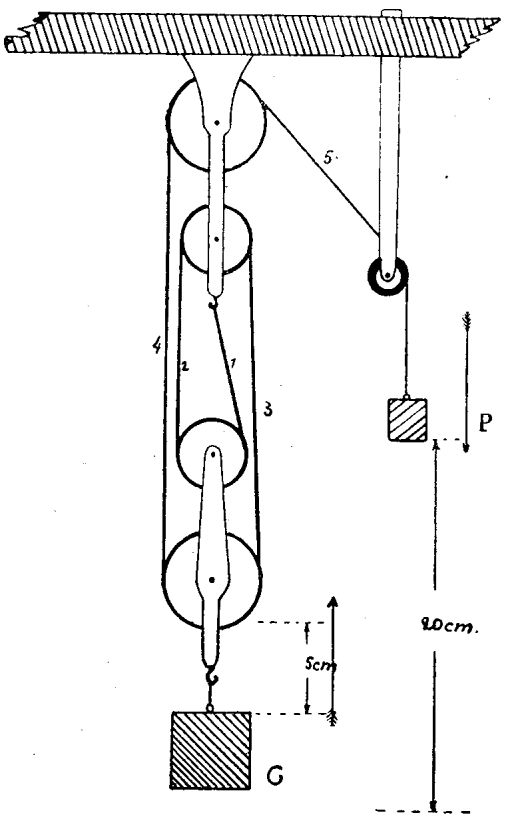


Рис. 21.

равновесие. Нам надо доказать, что равновесие, действительно, должно быть. Мы прежде всего отрицаем это равновесие—производим возможное перемещение, прилагая силу руки; только путем этого отрицания равновесия мы и можем выяснить, как велика работа всех уравновешивающих друг друга сил, так как для этого нужно перемещение, а при покое, при равновесии—его нет. После этого мы *выкидываем из нашего расчета действие нашей руки, нарушившей равновесие*, т. е. мы на языке диалектики отрицаем отрицание. В результате этого процесса мы возвращаемся как будто к старому, т. е. к равновесию, но за то мы получили существенно новое: мы узнали работу всех уравновешивающихся сил при любом возможном перемещении и пришли к заключению, что в сумме работа всех имеющихся сил равна нулю; мы находим, таким образом, то правило, которое должно выполняться при равновесии, т. е. находим правило Лагранжа. Перейдем теперь к применению правила Лагранжа к теории рычага. В той модели рычага, которая выставлена у нас здесь на столе (см. рис. 22), самый рычаг сделан из деревянной планки AB, могущей вращаться вокруг оси C. Эта планка будет в

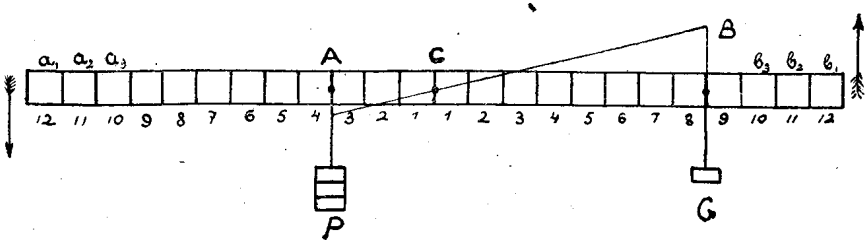


Рис. 22.

равновесии даже в отсутствии грузов. Почему? Дадим возможное перемещение, т. е. повернем рычаг в ту или другую сторону. Перемещение явно двухстороннее; при этом, так как планка во всех своих частях (a_1, a_2, a_3... b_1, b_2 и b_3) имеет одинаковый вес, то одновременно с опусканием любой части a_1, a_2, a_3 на данное число сантиметров, равные же по весу части b_1, b_2, b_3 и т. д. поднимаются на такое же число сантиметров. Таким образом, в сумме получается работа, равная нулю. Подвешиваем теперь неравные грузы P и G. Мы видим, что равновесие получается тогда, когда груз P во

столько раз больше G, во сколько СВ больше СА. Действительно, при повороте рычага вокруг С точка В поднимется или опустится во столько же раз больше, чем точка А, во сколько ОВ больше ОА—в данном случае в три раза. Но там, где перемещение в 3 раза больше, там сила в 3 раза меньше, так что опять правило Лагранжа, как мы видим, выполняется. Закон равновесия на рычаге, т. е. отношение

$$\frac{P}{G} = \frac{OB}{OA}$$

ясно показывает, как можно малой силой уравновесить большую, действуя на более длинное плечо рычага. На примерах применения рычага мы останавливаться не будем особенно долго, это составит задачу практических упражнений (см. Пособие к занятиям по физике. Изд. Ком. Унив. им. Я. М. Свердлова, 1924 г.). Остановим только наше внимание на двух случаях. Рассмотрим прежде всего важный рабочий аппарат человеческого организма—локтевой сустав, плечо и предплечье (см. рис. 23). Если груз, который нам надо поднять, приложен к кисти руки Р, то „плечо", на которое действует эта сила ОА—расстояние от кисти до локтевого сустава, как видно из чертежа, значительно больше, чем плечо ОВ, на которое действует мышца, приводящая в движение кисть с предплечьем. Таким образом, сила мышцы должна в 10—15 раз быть больше той силы, которую мы хотим преодолеть рукой. Выходит, как будто, что наш организм построен неправильно? Однако, мы сейчас увидим, какое получается от этого преимущество. Мы видим из чертежа, что большое перемещение кисти соответствует малому перемещению в местах прикрепления мышцы. Поэтому при больших размахах нашей руки мышца сокращается и вытягивается очень немного. С точки зрения строения мышцы гораздо проще осуществить механизм, развивающий большую силу, но делающий малые перемещения, чем наоборот. Поэтому при осуществлении механизма мышцы на первом плане стоит задача—при возможно малых переме-

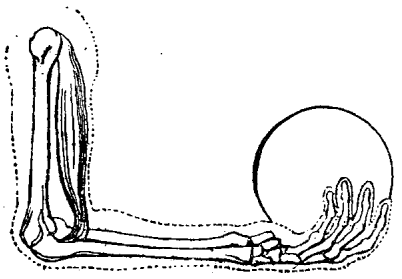


Рис. 23.

щениях добиться очень больших движений кисти руки. Это условие, как мы видим, выполнено. Возьмем теперь пример совсем из другой области: рассмотрим предохранительный клапан Папина. Отверстие парового котла закрывается крышкой (см. рис. 24), эта крышка упирается в рычаг, вращающийся около оси A; на противоположном конце B висит груз Q. Когда сила давления пара P, приложенная к крышке, будет во столько раз больше Q, во сколько AQ больше CA, силы будут уравновешены. Если сила P немного увеличится, равновесие нарушится, крышка приподнимет рычаг и даст выход пару. Таким образом, мы силу пара, могущую вызвать взрыв котла, заставляем предупреждать этот взрыв и устранять его. Это опять очень хороший пример перехода необходимости в свободу. Изучив законы действия сил—давление пара и законы рычага, мы, при полной невозможности изменить эти законы, по нашему желанию можем их направить к осуществлению каких угодно задач. Рассмотренная теория рычага дает ключ к пониманию действия т. н. „простых машин" — рычага, блока, ворота, клина и винта. Действие клина и винта вытекает из рассмотренной нами теории наклонной плоскости. При вращении гайки она движется по нарезке, представляющей собой наклонную плоскость, навернутую на цилиндр. Действительно, навертывая треугольник, вырезанный из бумаги и изображающий наклонную плоскость, на карандаш, мы получим винтовую линию. Перечисленные 5 машин были единственными, к которым сводилась вся практическая механика до конца XVII столетия [1]). Вне всякого сомнения, что всеми этими „простыми машинами" пользовались в XVIII и XIX столетии, да пользуемся и мы теперь, но только по мере развития машинного производства мы стали пользоваться

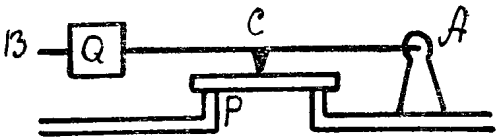


Рис. 24.

[1]) На это указывает Ньютон в своем знаменитом сочинении „Математические принципы натуральной философии", в котором заложены основы механики так, как мы ее понимаем теперь.

более сложными механизмами, в состав которых входят сложные комбинации этих простых машин. Кроме того, мы стали пользоваться новыми двигателями, паровыми машинами, паровыми турбинами, наконец, возникла совершенно новая область техники—электротехника. Необходимо отметить, что обозначение „простая машина" не совпадает с тем, что разумеет под машиной экономика, когда речь идет о „машинном производстве". Под машинным производством в этом смысле разумеется такое, при котором то орудие, которое было в руках человека, вставляется в механизм, и работа производится уже этим механизмом. Так, прядильная машина, введенная в Англии с 1735 г., определялась самим ее изобретателем, как машина, „чтобы прясть без помощи пальцев" [1]).

В заключение остановимся на одном вопросе, который часто немало смущает начинающих знакомиться с философией диалектического материализма. У нас все время речь шла о равновесии — об отсутствии движения, а ведь материю по учению диалектического материализма нельзя себе мыслить без движения. Противоречие раз'ясняется очень просто. То равновесие или тот покой, который мы изучали, относителен; в наших моделях не было движения, но ведь сами наши модели с этим зданием, со всеми нами, здесь находящимися, вращаются вместе с земным шаром и участвуют в движении земного шара вокруг солнца. Следовательно, нельзя сказать, что находящаяся в равновесии гиря совершенно лишена движения. Когда часть материи участвует одновременно в очень и очень многих движениях, движения эти непрерывно изменяются, при этом одни виды движения могут прекращаться, другие — могут возникать, не бывает только случаев, когда бы движение, где бы то ни было, в какой-либо части видимого нами мира, совершенно прекратилось, т. е. прекратились бы сразу все виды движения.

---

[1]) К. Маркс—Капитал. Том I, гл. XIII, стр. 323.

ЛЕКЦИЯ ЧЕТВЕРТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Движение под действием постоянной силы. Равномерно-ускоренное движение. Сила, масса и ускорение. Все ли тела падают на землю с одинаковой скоростью? Сопротивление воздуха. Падение тел в разреженном газе.

Переходим теперь к основной задаче механики, к выяснению тех условий, при которых осуществляется движение того или другого типа. Вернемся еще раз к тем фактам, какие мы уже наблюдали на атвудовой машине. Мы видели, что под действием перегрузка m (см. рис. 25) все три груза M_1+M_2+m проходили в первую секунду после начала движения—после откидывания верхней площадки—одно деление вдоль большой линейки прибора. Во вторую секунду пройденный путь был 3 деления, в третью—5, в четвертую — 7 и т. д. Движение получается ускоренное; но теперь спрашивается, как велика скорость в этом ускоренном движении в разные моменты движения? Можно ли сказать, что скорость в первую секунду была одно деление в секунду, а во вторую—три деления в секунду? Ясно, что такой ответ будет ошибочным; движение ускоряется непрерывно, в начале каждой секунды оно было медленнее, чем в конце. Как решить вопрос, с какой скоростью движутся грузы в конце второй или третьей секунды или по истечении 2,5 или 4,5 секунд? На этот вопрос можно ответить вполне определенно, раз мы знаем, что в данном движении путь S, пройденный за t секунд от начала движения, выражается формулой $S=bt^2$ (см. 1 лекцию); придется сделать сравнительно неболь-

шой математический расчет, но мы не будем сейчас отвлекаться математикой, а попытаемся решить этот вопрос на опыте, припоминая то, что мы уже в свое время узнали.

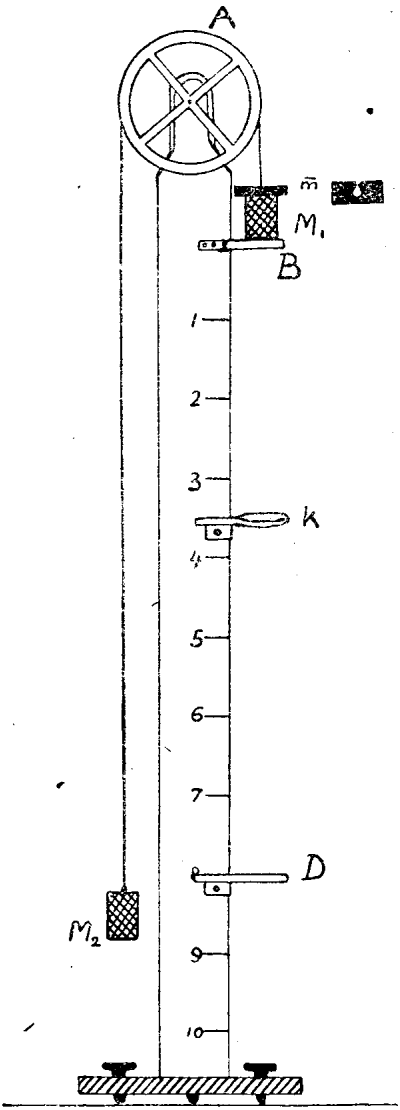


Рис. 25.

Вы видите, что добавочный груз m, который мы накладываем на одну из гирек M_1, имеет несколько больший размер в поперечном направлении; благодаря этому, мы можем снять этот добавочный груз в любой части пути, поставив на пути следования грузов вдоль линейки кольцо К. Это кольцо пропускает груз M_1 и задерживает перегрузок m. Поставим кольцо на два сантиметра выше 4-го деления нашей большой линейки. Это надо сделать, если мы хотим, чтобы груз m был снят в тот момент, когда нижний край M_1 достигнет четвертого деления, так как груз m лежит наверху гири M_1, которая имеет в вышину два сантиметра. Пусть груз M_1 с перегрузком опять стоит на откидной подставке В. Что произойдет, если мы подставку откинем? У нас начнется ускоренное движение, и через две секунды нижний край M_1 достигнет четвертого деления; в этот самый момент добавочный груз будет снят кольцом К. Как будет происходить движение дальше? Все силы, остающиеся после снятия груза, уравновешиваются; оба груза M_1 и M_2 одинаковы: ни тот, ни другой не перетягивают (мы отвлекаемся при этом от силы трения, тормозящей вращение блока—эта сила сделана на

машине возможно малой), таким образом, после снятия груза m, остающиеся грузы M_1 и M_2 будут двигаться, согласно первой аксиоме Ньютона (см. II лекцию), прямолинейно и равномерно и как раз с той скоростью, какую грузы имели в момент снятия добавочного груза m. Действительно, увеличение скорости вызывалось одним только действием перегрузка m и происходило вплоть до его снятия кольцом K; как только мы устранили влияние этого груза, скорость уже меняться не может, так как нет больше сил, способных производить это изменение. Такое движение, которое у нас получается после снятия груза, носит название движения по „инерции". Под словом „инерция", что значит в переводе „лень", „косность", разумеют то свойство материи, которое выражено в первой аксиоме Ньютона, именно: в отсутствии приложенных извне сил всякое тело сохраняет свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения. Т. е. если тело само не передает движения другим телам, и ему другие тела не передают движения, то скорость его не изменяется. Посмотрим теперь на опыте, будет ли движение после снятия груза m равномерным? Ставим нижнюю площадку D на четыре деления ниже 4-го деления, т. е. на 8-ое деление линейки. При одном из ударов метронома мы спустим подставку B и произносим „нуль", отсчитывая затем вслух удары метронома. Вы видите, что при втором ударе метронома (после нулевого) груз m был снят, а при третьем—груз M_1 ударился о площадку D. Скорость после снятия груза m в конце второй секунды после начала движения оказалась равной 4 делениям в секунду. Если движение у нас после снятия груза было действительно равномерное, то, чтобы доказать это, отставим нижнюю площадку еще на четыре деления, т. е. поставим ее на 12-ое деление. Повторяем опыт: „нуль", „раз", „два", „три", „четыре". Вы замечаете, что после снятия груза m, в две секунды был пройден путь вдвое больший, чем в одну секунду, т. е. движение получается, действительно, равномерное. Если мы отставили бы еще на 4 деления, то мы заметили бы, что груз чуть-чуть запоздает: в три секунды пройденный путь в действительности будет немного меньше 12 делений нашей линейки—в этом сказывается влияние трения оси блока: совершенно его устранить нельзя, но, как Вы сами видите, влияние

этого трения на нашей машине ничтожно мало. Таким же образом убеждаемся, что если мы кольцо отставим на 2 сантиметра выше 9-го деления, т. е. снимем груз m по истечении 3-х секунд от начала движения, то скорость движения по инерции будет не 4, а 6 делений в секунду. По истечении четырех секунд скорость будет 8 делений в секунду и т. д. Показать, что по истечении одной секунды скорость будет два деления в секунду—на нашей машине мы не можем, потому что на протяжении одного деления не умещается откидная подставка и кольцо.

Составим следующую таблицу:

Число протекших секунд от начала движения до снятия добавочного груза.	Скорость последующего равномерного движения — движения по „инерции".
1 секунда	2 деления в секунду $=2\times1$
2 секунды	4 „ „ „ $=2\times2$
3 „	6 „ „ „ $=2\times3$
4 „	8 „ „ „ $=2\times4$
. . . . .	
t секунд	2t „ „ „ $=2\times t$

Если в каждом делении уместится b делений, выраженных в какой-либо другой мере, то все числа второго столбца надо умножить на b, так как во втором столбце даны числа больших делений, а в каждом большом делении, мы предполагаем, помещается b малых.

Итак, общее выражение скорости движения по инерции при снятии груза по истечении t секунд от начала движения на Атвудовой машине приводится к формуле:

$$V=2bt \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

Но ведь скорость движения по инерции и есть скорость данного движения в тот момент, когда мы сняли добавочный груз. Таким образом, мы нашли способ вычислять скорость нашего ускоренного движения для любого момента t, а с помощью кольца мы всегда можем проверить этот вывод. Для этого надо как раз в момент t снять добавочный груз и посмотреть, какова будет скорость последующего равномерного движения.

Итак, скоростью какого угодно неравномерного движения в любой момент называется скорость того равномерного движения по инерции, которое получается, если

мы в этот самый момент устраним действие силы, вызвавшей данное неравномерное движение.

Из формулы (3) видно, что в каждую секунду скорость нарастает на 2b или, если мы будем измерять расстояния крупными делениями нашей линейки: на 2 деления в секунду. В самом деле, если мы положим в формуле (3) t=1, то получим V_1=2b; при t=2 получим V_2=4b, т. е.=2b+2b и т. д.: *в каждую секунду скорость нарастает на* 2b *делений в секунду. Этот прирост скорости в каждую секунду называют ускорением движения.*

Из того, что мы наблюдали, ясно, что при движении на атвудовой машине ускорение

$$g=2b \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

не меняется во все время движения. Вот почему движение такого вида называется *равномерно-ускоренным.* Поставим себе теперь вопрос, как велико ускорение при равномерном движении? Так как скорость равномерного движения остается постоянной, то прироста скорости не наблюдается вовсе. Таким образом, ускорения в равномерном прямолинейном движении вообще нет или, как говорят математики, оно равно нулю.

Итак, мы видим, что движение на атвудовой машине, вызванное перегрузком, есть движение *равномерно-ускоренное*, т. е. движение *с постоянным ускорением*—постоянным во все *время движения.* Изменялась ли сила во время движения? Добавочный груз все время сохранял свой вес, поэтому и движущая сила (т. е. вес перегрузка m) все время движения оставалась неизменной. *Мы приходим к очень важному выводу: неизменная, т. е. постоянная по величине и по направлению, сила вызывает равномерно-ускоренное движение, т. е. движение с постоянным ускорением—движение того типа, какое происходит под действием силы тяжести на атвудовой машине. Мы нашли, наконец, то необходимое условие, которое должно быть выполнено, чтобы у нас получилось равномерно-ускоренное движение. Для этого на движущееся тело должна действовать сила, неизменная по величине и по направлению.* Сопоставим еще раз формулы, характеризующие равномерно-ускоренное движение.

Пройденный путь $s=bt^2$ . . . . (1)

Скорость по истечении t секунд v=2bt . . . (2)

Ускорение g=2b . . . . (3)

Первую и вторую формулу можно написать еще и иначе, заменяя 2b через g и b через $\frac{g}{2}$

Пройденный путь $s=\frac{gt^2}{2}$ . . . . (1[1])

Скорость $v=gt$, . . . (2[1]).

Посмотрим теперь, как зависит движение на атвудовой машине от величины действующей силы, т. е. от веса перегрузка m.

Сделаем следующий опыт. Положим на груз M_1 (рис. 26) перегрузок $m_1=6$ грамм, а на M_2 — $m_2=2$ грамма. Перевес бу-

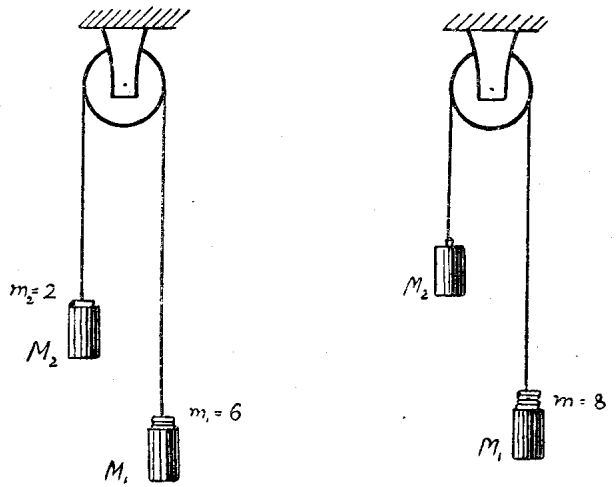


Рис. 26.

дет на стороне M_1+m_1 и притом перевес в 4 грамма, т. е. такой же, какой был в тех опытах, какие мы проделывали раньше, так как вес груза m был 4 грамма. Повторяем опыт и убеждаемся, что наши грузы проходят так же, как и раньше, в две секунды—4 больших деления и в три секунды—9 делений. Перекладываем теперь груз m_2 на другую сторону вместе с грузом m_1—теперь перевес будет вдвое больше—8 грамм, количество движущихся грузов не изменится: мы только переложили одну гирьку справа налево. Повторяем опыт. Мы видим, что теперь движение происходит вдвое быстрее: в две секунды пройденный путь будет 8 делений, в три—18 делений. В одну секунду пройденный путь будет два деления. Таким образом, самый характер

движения остается тот же: мы можем попрежнему вычислять пройденные пути, скорости и ускорение с помощью только что написанных формул (1), (2), (3), только число b надо удвоить. В первом ряде произведенных опытов b=1; действительно, путь, пройденный в первую секунду, измерялся одним делением, а теперь у нас он стал вдвое больше. Вдвое больше стало и ускорение. *Итак, если при одном и том же движущемся теле неизменно действующая, постоянная по величине и по направлению, сила увеличивается вдвое, то вдвое же возрастает и ускорение, иначе—ускорение пропорционально действующей силе.* Таким образом, если нам понадобится получить движение равномерно-ускоренное, но с увеличенной в несколько раз величиной ускорения, то мы теперь знаем уже, что надо сделать: надо во столько же раз увеличить соответствующую силу. Посмотрим теперь, как зависит ускорение от количества вещества, приходящего в движение, или, как говорят в механике, от массы движущихся тел. Устанавливаем опять груз M_1 с перегрузком m=4 грамм на откидной подставке и убеждаемся, повторяя опыт, что попрежнему наши грузы проходят в три секунды 9 делений вдоль нашей линейки. Повторим этот опыт, надев на каждый из грузов M_1 и M_2 по добавочному грузу M_0, вдвое меньшему по весу, чем грузы M. Мы увеличиваем, таким образом, количество движущегося вещества или массу в полтора раза: было с каждой стороны по M, теперь стало по $M+{}^1/_2M$. Производим теперь самый опыт. Вы видите, что движение замедлилось в полтора раза. В самом деле, в три секунды наши грузы проходят теперь путь, равный 6 делениям вместо 9. Отсюда делаем вывод: *если действующая сила осталась без перемены, а масса увеличилась в несколько раз, то ускорение уменьшается во столько же раз* [1]).

Этот опыт вызывает часто большое недоумение у начинающих заниматься механикой; всегда кажется, что, раз мы увеличиваем массу, должно увеличиться и ускорение. Нам всегда кажется, что более тяжелое—более массивное тело должно быстрее падать. Основывается это недоразумение на

[1]) При этих расчетах мы пренебрегаем массой вращающегося блока, но в нашей машине блок очень легок, он сделан из алюминия, и поэтому ошибка, которую мы сознательно допускаем, не велика.

том, что мы на практике не отличаем массу от веса, и во многих случаях в нашей повседневной жизни большой беды от такого смешения понятий не получается—вот почему для более строго-научного подхода к этому вопросу нам пришлось пользоваться специальным прибором—атвудовой машиной, и мы не могли начать разбора этого явления, по нашему обыкновению, со случаев, хорошо всем и каждому знакомых. Во всех случаях на практике разбираемые нами сейчас явления протекают в гораздо более сложной и запутанной форме. Постараемся выяснить различие между массой и весом. Весь ли вес всех движущихся на атвудовой машине грузов вызывает движение? Ясно, что нет. Пока у нас на нитке висели только грузы M_1 и M_2 никакого движения не получалось: веса грузов M_1 и M_2 уравновешивали друг друга, они движения не вызывали. *Приводит в движение только один добавочный груз* m, *приходит же в движение как добавочный груз, так и грузы* M_1 *и* M_2. Таким образом, массы грузов M_1 и M_2 полностью принимают участие в движении, вес же их уравновешен и никакого влияния на движение не оказывает. Что же такое масса? Массу Ньютон определял, как количество вещества—как количество материи. Но как можно сравнивать количества разнородных веществ, например, меди и сахара, и сказать, что у меня одинаковое количество материи в виде меди или в виде сахара? Ньютон предполагал, что все вещества состоят из одной первичной материи; тогда равенство масс двух разнородных веществ, обладающих разными химическими и физическими свойствами, приводится к равенству количества первичной материи, которая вошла в состав того и другого тела.

Мы можем даже придумать такой случай, когда масса останется без изменения, а вес изменится. Вес, как было установлено Ньютоном, зависит от притяжения земным шаром. Так как планета Марс меньше земного шара и слабее притягивает все находящиеся на ней предметы, то веса всех знакомых нам предметов на Марсе будут меньше. Если бы мы перенесли гирю в один килограмм, висящую на пружинных весах, вместе с весами на Марс, то указатель весов показывал бы меньше, чем один килограмм: вес гири уменьшился бы при том, *но масса, т.е. количество вещества, осталась бы при этом без изменения.* С другой стороны, если бы мы перенесли машину Атвуда с

уравновешенными на ней грузами M_1 и M_2 на Марс, то и на Марсе они будут уравновешивать друг друга: оба груза стали легче в одинаковое число раз. То же самое имеет место и с обыкновенными весами с чашками и коромыслом. Если мы имеем граммовый разновес, то на весах с коромыслом мы всегда и везде отвесим такое же количество вещества, такую же массу, как и на земле, несмотря на то, что вес как гирек, так и отвешиваемого вещества будет разный: на земле один, на Марсе—другой. Если бы измерение производилось на луне, то веса всех тел уменьшились бы в 80 раз. Таким образом, на весах с коромыслом мы отмериваем массу, на пружинных же весах мы определяем вес. Но в одном и том же месте на поверхности земного шара мы тем и другим способом можем получить и массу и вес. Для измерения того и другого у нас даже одни и те же обозначения—килограмм и его доли—граммы. Разница только в том, что килограмм-масса есть величина вполне определенная. Килограмм-сила—понятие относительное, надо всегда при этом сделать оговорку, где произведено измерение, так как даже на земной поверхности в разных ее частях притяжение земли, а следовательно, и вес не вполне одинаковы. Мы увидим впоследствии, что, главным образом, вследствие суточного вращения земного шара притяжение земли немного слабее на экваторе, чем на полюсах, хотя разница эта составляет всего около 5 тысячных долей всего веса. Так, если на пружинных весах на экваторе мы от данного груза получим один килограмм или 1000 грамм, то на северном или на южном полюсе мы получим около 1005 грамм.

Результаты произведенных нами опытов можно обобщить; это обобщение было сделано Ньютоном и составляет вторую аксиому механики. Эта аксиома может быть сформулирована следующим образом: *сила измеряется произведением массы на ускорение.*

$$P = M_0 a \ldots\ldots\ldots (4),$$

где P—сила, M_0 – масса, a—ускорение.

В самом деле, когда мы увеличивали на атвудовой машине действующую силу P в два раза (перемещая все добавочные грузы в одну сторону и сохраняя при том общую массу $M_0 = M_1 + M_2 + m_1 + m_2$), то ускорение должно было возрасти согласно формуле (4) в два раза, так ведь и было в

действительности. Далее, когда мы сохраняли действующую силу P и увеличивали массу M_0 в полтора раза, то ускорение уменьшалось в полтора раза. Это следует и из нашей формулы. Если один из множителей M_0 увеличился в полтора раза, а произведение P осталось без перемены, то другой множитель должен был уменьшиться в полтора раза — в согласии с результатами нашего опыта. Теперь попытаемся решить вопрос, во сколько раз ускорение при свободном падении больше, чем на атвудовой машине? Отчего вообще на атвудовой машине ускорение меньше, чем при свободном падении? Оттого, что значительная часть *веса* движущихся грузов уравновешена, действует только малая часть—именно перегрузок m. При свободном падении действовать будет вес всего груза 2M+m (оба груза M_1 и M_2 одинаковы), поэтому ускорение будет больше во столько раз, во сколько 2M+m больше m, потому что, как показывает практика, и вес возрастает пропорционально массе. Если произвести расчет, то оказывается, что при свободном падении в первую секунду пройденный путь будет измеряться 490,5 сантиметра, т. е. почти пятью метрами (около двух с половиной саженей). Ускорение же при свободном падении будет измеряться числом 981. В каждую секунду при свободном падении скорость будет нарастать на 981 сантиметр в секунду.

Вторая аксиома Ньютона дает нам возможность установить еще один способ измерять силы, именно способ, основанный на измерении того действия, которое производит сила, вызывая то или иное движение. Положим, что в формуле (4) масса равна 1, т. е. одному грамму, и пусть сила такова, что сообщаемое ею ускорение, т. е. прирост скорости в каждую секунду, измеряется одним сантиметром в секунду. Тогда мы получаем P=1. Отсюда естественно принять за единицу силы при этом способе измерения именно эту силу. Итак, *за единицу силы мы принимаем такую силу, которая единице массы* (одному грамму) *сообщает единицу ускорения* (в одну секунду увеличение скорости в один сантиметр в секунду). *Эта единица силы носит название дины* (от греческого „Динамис", что значит сила). Мы видели, что при свободном падении ускорение будет в 981 раз больше, т. е. вес одного грамма сообщит массе этого грамма в секунду прирост скорости в 981 сантиметров в секунду, т. е. в 981 раз большее ускорение, чем то, которое вызывается одной диной. Итак,

вес одного грамма равняется 981 дине. Это дает нам возможность силы, измеренные в динах, переводить в граммы и килограммы, и наоборот. В самом деле, пусть нам дана сила в 981000 дин, сколько это будет грамм? Так как каждый грамм равен 981 дине (в том месте, конечно, земного шара, где ускорение равно 981), то число грамм, заключающееся в 981.000 дин, будет: $\frac{981.000}{981}$=1000 грамм или=1 килограмм. Наоборот, скольким динам равна сила в 10 грамм? Так как каждый грамм равняется 981 дине, то 10 грамм составят 9810 дин. Какое же, спрашивается, преимущество в этом способе измерения сил? Если мы выразим силу в динах, то к этому добавлений о том, где было произведено измерение, делать не надо, так как при этом уже учтена величина ускорения; величина ускорения, умноженная на число грамм массы, и есть число дин; сила же в граммах зависит от величины ускорения: грамм силы на полюсе на пять тысячных больше грамма силы на экваторе. Если мы находимся в каком-либо месте земного шара, скажем в Архангельске, где ускорение силы тяжести 982,5, то для перевода из дин в граммы надо брать число 982,5 вместо 981,6 (для Москвы). Отсюда ясно, что выгоднее прямо производить измерение силы в динах, чтобы не иметь нужды делать упоминания, где было произведено измерение [1]), и указывать величину этого ускорения в том месте, где производилось измерение.

Говоря об ускорении при свободном падении, мы подразумеваем, что все тела падают с одинаковым ускорением. Но точно ли все тела падают с одинаковым ускорением? Мы показали, как можно было получить величину ускорения при свободном падении; для этого мы определили величину ускорения на атвудовой машине и, пользуясь второй аксиомой Ньютона, рассчитали, во сколько раз ускорение при свободном падении должно быть больше: оно будет больше во столько раз, во сколько общий вес всех движущихся на атвудовой машине грузов больше веса перегрузка m, вызвавшего движение. Для всех ли грузов, однако, получится одно и то же

[1]) Способ измерения в динах носит название „динамического", т. е. способа, основанного на измерении того движения, которое производит сила, в отличие от „статического" — от слова статика — учение о равновесии — способа (см. II лекцию), при котором силы измерялись в то время, когда они давали равновесие, например, на пружинных весах.

ускорение? Все ли тела будут падать одинаково? По второй аксиоме Ньютона это должно быть именно так. Представим себе несколько шариков, скажем 5, сделанных из свинца или какого угодно другого металла, пусть эти шарики совершенно одинаковы—имеют одинаковую массу и, следовательно, как показывает опыт, одинаковый вес p. Обозначим ускорение при свободном падении через g, тогда для каждого из грузов мы можем написать равенство:

$$p = mg \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Сплавим теперь эти пять шариков в один большой. Математически это значит сложить пять одинаковых равенств (5), в сумме это даст:

$$5\ p = 5m \times g \quad \ldots\ldots \quad (5^1)$$

Если взять свинца в 5 раз больше, то и масса и вес возрастут в 5 раз. Уравнение (5^1) показывает, что ускорение остается то же самое. Итак, если верна вторая аксиома Ньютона, то все тела, независимо от их массы, должны падать с одинаковой скоростью—с одинаковым ускорением. Посмотрим теперь, выполняется ли это в действительности? Я беру в руки латунный диск (кружок), вырезанный из толстого листа латуни, и беру таких же размеров кружок, вырезанный из листа бумаги. Я держу оба кружка на одной и той же высоте над полом и одновременно бросаю их. Вы ясно видите, что латунный кружок гораздо раньше бумажного упал на пол. Таким образом, мы вступаем в явное противоречие с аксиомой Ньютона. Но марксист, знающий, что всякое развитие, в том числе и развитие науки, идет путем противоречий, не должен этим смущаться. Посмотрим, как разрешается это противоречие. В каком случае могут быть верными уравнения (5 и 5^1)? Только в том случае, если на испытуемые тела действует *одна только сила тяжести*. А уверены мы в том, что на наши кружки, когда мы их бросили на пол, действовала одна только сила тяжести? Всякий из Вас по опыту знает, что если махать листом бумаги в воздухе, то движение бумаги тормозится сопротивлением воздуха. Таким образом, при падении кружков, кроме силы тяжести, надо принимать во внимание и сопротивление воздуха. Этот пример показывает, как при решении любой задачи в области естествознания надо соблюдать основное положение диалектики; надо помнить, что все явления между

собой связаны, и если мы и можем и порой должны изучать влияние того или другого фактора данного явления отдельно, то никогда нельзя забывать всей совокупности явлений в целом. Оказывается, что сопротивление воздуха зависит от площади поперечного сечения движущегося в воздухе тела, поэтому для двух дисков одинакового размера сопротивление воздуха одинаково. Предположим для примера, что сопротивление воздуха, действующее вверх, т. е. против движения, вызванного силой тяжести для наших дисков, равно 500 динам; вес металлического диска (1000 грамм) равняется 981.000 дин, а вес бумажного—981 дина (один грамм). Применим аксиому Ньютона к этим двум случаям, принимая в расчет, что у нас действует *не одна сила тяжести, но и противоположная ей по направлению сила сопротивления воздуха,*— получаем два уравнения: в левой части разность сил, в правой произведение массы на неизвестные нам ускорения, которые мы определяем из этих уравнений.

$$981.000—500=980.500 = 1000\ x \quad . . . \quad (6) \text{ и}$$

$$981—500=481=1.\ x_1 \quad . . . . \quad (6^1).$$

Для ускорения металлического диска получаем число очень близкое к $981— x =980{,}5$, а для бумажного почти вдвое меньшее число $x_1=481$. Происходит это потому, что одна и та же сила 500 дин очень мала по сравнению с 981.000 дин и весьма значительна по сравнению с 981 диной. Обращаем внимание на то, что число 500 дин взято произвольно только для того, чтобы об'яснить, в чем заключается самое явление. Верно ли наше об'яснение? Если оно верно, то стоит только устранить влияние сопротивления воздуха, как сейчас же скорость падения должна увеличиться. Я накладываю бумажный кружок на латунный и бросаю их; Вы видите, что они оба падают вместе: тяжелый кружок как бы рассекает воздух для легкого бумажного, и он падает с такой же скоростью, не отставая. Однако, можно, пожалуй, возразить: бумажный кружок прилипает к латунному, чтобы устранить это возражение, возьмем длинную трубку, в которой находится шарик, скомканный из листового олова и окрашенные в яркие краски перья. Когда мы опрокидываем трубку, то ясно видно, как перышки медленно падают, тогда, как шарик падает быстро. Мы выкачиваем из этой трубки воздух

с помощью насоса, приводимого в движение электрическим двигателем.

Повторяем опыт и видим, что теперь и перья падают совершенно так же быстро, как и шарик. Вы видите, что доказать одно из основных положений механики, именно, что под действием силы тяжести все тела, независимо от их массы и веса, падают с одинаковым ускорением, не так легко: надо производить опыт в пространстве с сильно разреженным воздухом. В обычной же обстановке, в нашей повседневной жизни мы видим как раз обратное. Вот почему на первых порах трудно примириться с мыслью что, если бы не сопротивление воздуха, все тела должны падать одинаково! От этого и мы в сегодняшнем рассказе не могли ссылаться на наш житейский опыт, по этой же причине и тот взгляд, который теперь прочно установлен и который мы сегодня изложили, не сразу установился. История науки рассказывает нам, с какой ожесточенностью велась борьба между Галилеем в конце XVI столетия и сторонниками Аристотеля, полагавшего, что скорость падения тел пропорциональна их весу. Во времена Галилея нельзя было произвести опыта с выкачиванием воздуха, не было воздушных насосов, и поэтому Галилей, чтобы убедить своих противников, бросал с колокольни в Пизе тела разного веса (это было в 1589 году): большие ядра в 100 фунтов и маленькие [1]). На опыте получалась ничтожная разница. Легкие тела отставали меньше, чем на „ширину руки", от тяжелых. При общей высоте падения в 200 фут. эти очень убедительные опыты не могли, однако, убедить сторонников Аристотеля: они предпочитали не верить своим глазам, чем отступить от учения знаменитого философа.

Но почему, спрашивается, в эту пору, в конце XVI и в самом начале XVII столетия в науке стали на очередь эти сложные вопросы, и почему это случилось в Италии? До открытия Америки (1492 год) и до установления пути в Индию вокруг Африки, Италия находилась как раз на единственном торговом пути из Западной Европы в Индию. Поэтому государства Италии были почти монополистами в этой торговле [2]). У них

[1]) Вес самого малого из бросаемых тел был все-таки весьма значителен, по сравнению с сопротивлением воздуха.

[2]) См. М. Н. Покровский—Экономический материализм, стр. 5.

сильно развились ремесла и промышленность. С открытием морских путей их влияние начало падать, при чем обострилась борьба с соседями—это повело к войнам и усовершенствованию тогдашних сравнительно простых вооружений. Пришлось внимательнее исследовать, как движутся ядра тогдашней примитивной артиллерии. Еще в XV столетии думали, что движение ядра происходит по дуге круга, потому что, как учил Аристотель, круг есть совершенство, и самое совершенное движение должно быть по кругу. Еще значительно раньше Галилея, Тарталья в 1537 г. показал, что ядра летят не по кругу, но только Галилей выяснил, что движение происходит по параболе (см. I лекцию), а мы видели, что такое движение получается от сложения равномерного движения с равномерно-ускоренным. Отсюда ясно, что практические потребности обратили внимание, вынудили заняться теми теоретическими вопросами, которые мы разбирали сегодня. На следующей лекции мы познакомимся с целым рядом практических применений установленных нами сегодня положений, но мы увидим, насколько сложны вообще те явления, с которыми нам приходится встречаться в повседневной жизни, и тогда мы поймем, почему нам сегодня пришлось изучать законы механики на специальных приборах—на атвудовой машине—трубке с разреженным воздухом, и почему эти явления трудно было бы распутать на каком-либо фабричном станке или машине.

ЛЕКЦИЯ ПЯТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Равенство действия и противодействия. Применение этого положения к случаю движущихся тел. Силы инерции. Центростремительная и центробежная силы.

Нам осталось еще рассмотреть третью аксиому, лежащую в основе механики Ньютона. Самая формулировка этой аксиомы и простейшие ее применения к случаям равновесия не вызывают обыкновенно серьезных затруднений: дело представляется так, как будто бы речь шла о чем-то вполне очевидном; однако, при попытках применить эту аксиому к простейшим типам движения, мы встречаемся с целым рядом затруднений, на первый взгляд кажущихся непреодолимыми.

Формулируется третья аксиома Ньютона следующим образом: „Всякому действию бывает равное по величине и противоположное по направлению противодействие“, или в сокращенном виде: „Действие равно противодействию“. Когда гиря висит на пружинных весах, то сила противодействия пружины как раз равна действию груза, т. е. его весу. Если я держу в руках гирьку, то усилие, которое я должен делать, как раз равно весу гирьки. У нас здесь на столе стоит следующий прибор: на легко подвижной тележке укреплена в наклонном положении стеклянная пробирка; в пробирку налито немного воды, и она плотно закрыта резиновой пробкой, к которой прикреплен свинцовый груз A (см. рис. 27); под нижним концом пробирки помещается спиртовая лампочка. Мы зажигаем лампочку; через некоторое время вода закипает; выделившийся пар выбрасывает пробку с грузом A,

причем тележка с пробиркой и спиртовой лампочкой откатывается назад под действием силы „противодействия". „Действие" состоит в выталкивании „снаряда", состоящего из свинцового шара с пробкой,—„противодействие" же приводит к „отдаче". Человек прыгает из лодки на берег—лодка

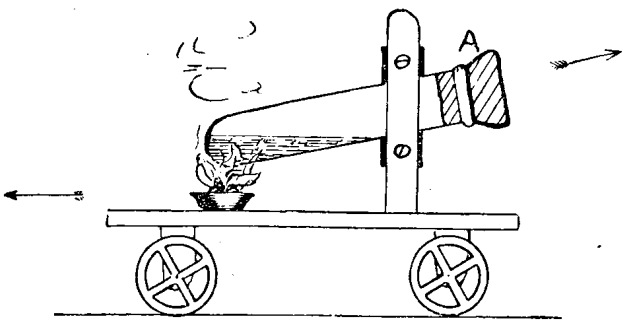


Рис. 27.

получает толчок от берега. Подобного рода примеров можно привести сколько угодно. Трудности же начинаются с того момента, как мы попытаемся применить эту аксиому Ньютона *к движущимся телам в самом процессе их движения*, а между тем эта аксиома приложима как к покоющимся, так и движущимся телам. Положим, я тяну за веревку нагруженные дровами сани, я чувствую противодействие саней, по Ньютону это противодействие равно той силе, с которой я тяну сани. Сейчас же возникает возражение: если сила тяги равна силе противодействия, то сани с места не сдвинутся! Правда, если мы тащим сани по ровной дороге, и сани идут с постоянной скоростью, то-есть движение саней равномерное и прямолинейное, тогда сила тяги и сила сопротивления должны уравновешиваться. Мы ведь видели, что признак отсутствия сил или их взаимного уравновешивания и состоит в том, что мы имеем случай покоя или равномерного и прямолинейного движения. Но как быть в том случае, когда сани стояли, т. е. находились в покое, и мы, потянув их за веревку, привели их в движение, могло ли действие и противодействие уравновешиваться в каждый данный момент, в течение всего процесса перехода от покоя к движению, т. е. в процессе ускорения?

Аксиома Ньютона указывает, что в те моменты, когда мы увеличиваем наше усилие, желая ускорить движение, тело, которое мы приводим в движение и которому мы сообщаем ускорение, оказывает увеличенное противодействие. Ускоряющееся тело приобретает движение, то, которое приводит в движение его, теряет. Когда я тяну сани и подвигаюсь с ними вперед, то я как бы передаю им часть своего движения, вследствие чего я иду медленнее, чем я шел бы при том же усилии без саней. Вот *это противодействие, которое оказывает ускоряемое тело на то, которое производит в нем ускорение, называется силой „инерции"*. Действие всякой внешней силы состоит в том, что она изменяет механическое состояние того тела, на которое она действует, „преодолевает его инерцию", и вот всякое „преодоление инерции", всякое изменение движения и всякое возбуждение движения в покоющихся телах сопровождается противодействием, носящим название силы инерции. Проверим это положение на ряде опытов. Подвесим на пружинные весы гирю, скажем, в 10 фунтов; всякий по личному опыту знает, что надо спокойно держать в руках весы, так как иначе указатель весов все время колеблется. Теперь дернем сразу весы вместе с висящей гирей вверх, мы сейчас же заметим, что в тот момент, когда мы дернули весы вверх, указатель весов опустился и показал в этот момент больше 10 фунтов. Это понижение указателя бывает очень кратковременным, так как, дернув весы вверх, мы тотчас же после этого их останавливаем, вследствие чего указатель весов поднимается и начинает качаться вверх и вниз. Что значит, что при ускоренном движении вверх указатель весов опустился? Для того, чтобы поднять весы с грузом вверх, надо было увеличить силу руки, поддерживающую весы; при этом ускоренном движении груз оказывает „противодействие", и вот это противодействие, или „сила инерции", присоединяется к силе тяжести или весу гири и оттягивает пружину и указатель весов ниже 10 деления. Укрепим теперь пружинные весы к доске А, на которой у нас положены кирпичи. Если мы потянем за крючек этих весов В (рис. 28), то показания весов укажут нам величину тяги, приложенной к доске. Если мы возьмем в руки кольцо других весов Д (см. рис. 28) и зацепим крючком их за крючек весов В, то показания этих вторых

весов укажут нам, с какой силой приводимая в движение доска с грузом кирпичей оказывает противодействие—действию руки. Если мы будем удерживать доску рукой, чтобы она не двигалась, а другой рукой будем тянуть весы Д, то показания и тех и других весов—если они были предварительно выверены—будут одинаковы. Это будет пример

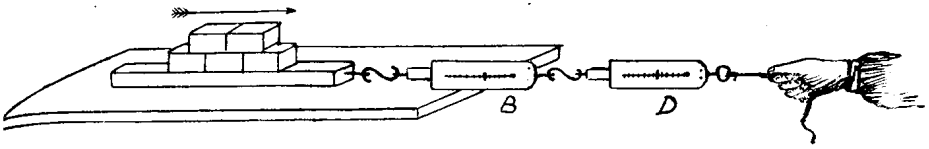


Рис. 28.

на действие и противодействие в состоянии покоя. Если мы отпустим руку, придерживавшую доску, и будем двигать доску вдоль стола через посредство весов Д—будем то ускорять, то замедлять движение, то у нас указатели весов будут все время перемещаться то в ту, то в другую сторону, но *эти перемещения будут все время одинаковы у тех и у других весов. Это будет нам указывать, что равновесие между действием и противодействием непрерывно нарушается и сейчас же вновь восстанавливается.* Возьмем еще один пример. На нитке, которую я держу в руках, висит гиря в 5 фунтов. Я держу руку неподвижно, для этого я должен делать усилие в 5 фунтов. Я быстро увеличиваю эту силу, т. е. дергаю нитку вверх. Этим самым я сообщаю ускорение вверх спокойно висевшей гире—я привожу ее в движение из состояния покоя—я нарушил равенство действия и противодействия, вызвав движение—я увеличил действие, но в процессе движения развивается противодействие, которое как раз уравновешивает увеличение силы моей руки, вызвавшей это движение. Что гиря оказала большое противодействие, потянув через нить мою руку—Вы видите сами—нить не выдержала этого добавочного натяжения и оборвалась. Попробуем сделать теперь простой расчет. На рис. 29а изображена покоющаяся гиря. Сила руки P_0 равна весу гири, а вес по второй аксиоме можно представить, как произведение массы гири на ускорение g (при свободном падении для Москвы $981\frac{\text{ст.}}{\text{сек.}^2}$). Итак мы имеем $P_0=mg$.

На рис. 29в изображено распределение сил в тот момент, когда мы дергаем нить кверху. Сила руки P_1 должна быть в этом случае больше веса, иначе движения не могло бы получиться, и вот эта разность P_1—mg, направленная вверх, и вызывает ускоренное движение гири m вверх с ускорением a.

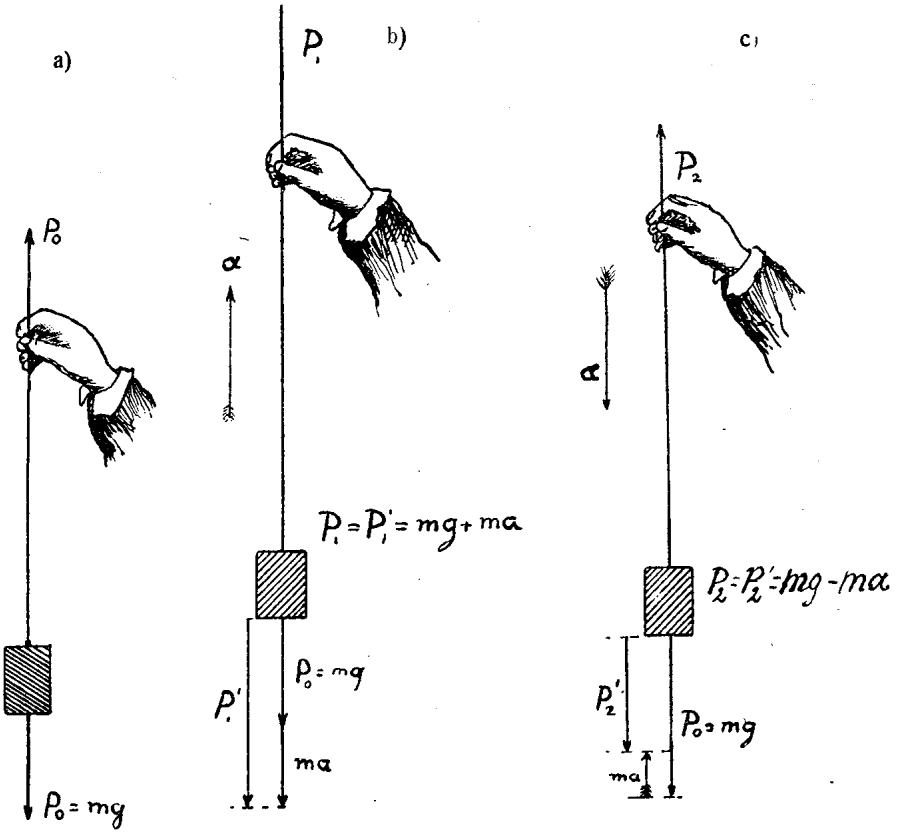


Рис. 29.

По второй аксиоме имеем: действующая сила P_1—mg= массе m, умноженной на ускорение a, или P_1=mg+ma (7). Но, по третьей аксиоме, с такой же силой гиря должна тянуть руку, т. е. эта сила P^1_1 должна равняться весу mg+ „сила инерции", измеряемая произведением массы на ускорение и направленная в сторону, противоположную ускорению, вот эти две силы P_1 и P^1_1 каждая больше, чем вес P_0=mg, растягивают нитку и разрывают ее. Теперь положим, что мы таким же толчком опускаем руку вниз, т. е. сообщаем неко-

торое ускорение a вниз. В этом случае сила руки P_2 меньше веса гири. Перевес силы тяжести $mg—P_2$ вызывает движение с ускорением a вниз. Опять, по второй аксиоме, $mg—P_2=ma$ или $P_2=mg—ma$...(8), но, по третьей аксиоме, с такой же силой $P^1_2=P_2=mg—ma$ (8_1) гиря тянет через посредство нитки руку. Таким образом, и в этом случае уменьшившееся действие, нарушившее *прежнее* равновесие, вызывает уменьшенное противодействие, поэтому у нас восстанавливается равновесие

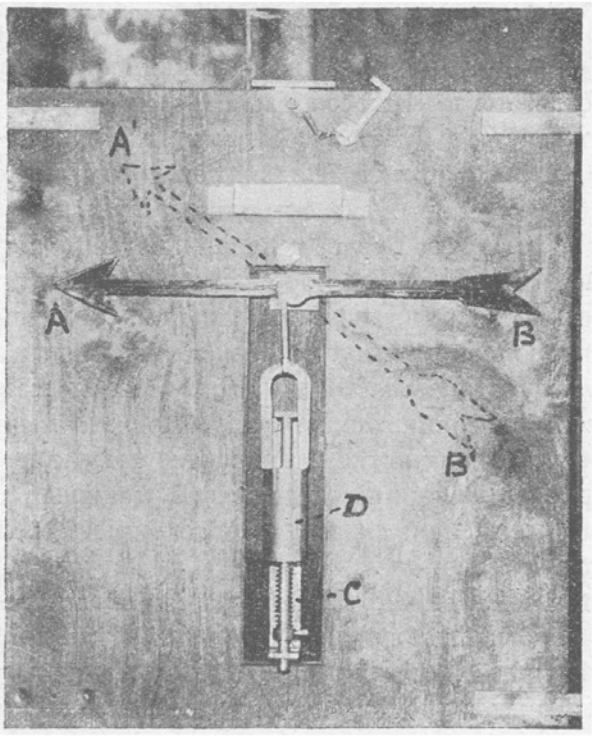


Рис. 30.

„на новой основе". Восстановление происходит за счет силы инерции или противодействия ускоряющего груза m. Это уменьшение действия веса при ускоренном движении вниз, т. е. в сторону действия силы тяжести, мы можем сейчас показать на падающих пружинных весах (см. рис. 30). У нас к доске, которая может скользить вдоль проволок, прикреплены пружинные весы, на которых лежит прикрепленная к пружине гиря D. Конец пружины связан с большой

стрелкой AB. Когда груз давит на пружину, то стрелка занимает положение (AB). Если я теперь приподнимаю груз пальцем и даю пружине расправиться, то стрелка поворачивается и занимает положение (A^1B^1). Я поднимаю при помощи длинной палки доску с пружинными весами вдоль проволок, на сколько могу, вверх и затем, отдернув палку, предоставляю весам падать, скользя вдоль проволок. Вы видите, что во время падения стрелка переходит из положения AB в положение A^1B^1, т. е. свободное падение производит такое же действие, как будто груз перестал давить на пружину, потому что, как мы раньше видели, стрелка принимает положение A^1B^1 только тогда, когда мы освобождаем пружину от давления груза. Но ведь это будет в соответствии с нашей формулой (8) и (8^1), если ускорение при движении вниз будет не a, а g, т. е. если падение будет свободным, то для P_2 и P^1_2 мы получаем O, т. е.,как будто, тело при падении потеряло вес. Изложенные нами сейчас соображения играют громадную роль в технике. Представим себе под'емную машину, висящую на проволочном канате, которая опускает и поднимает людей и руду в шахтах. Когда нагруженная машина трогается вверх, то происходит то же самое, что мы наблюдали на гире, висевшей на нитке, когда мы ее сразу двигали вверх; сила инерции приводимой в движение машины производит усиленное натяжение каната: в этот момент канат может оборваться. А ведь под'емная машина может начать двигаться после остановки где нибудь на середине пути и, сорвавшись, полететь обратно на большую глубину. Вот почему толщину каната надо рассчитывать, не только принимая во внимание наибольший груз, поднимаемый машиной, но и необходимо знать ту силу инерции, которая появится при ускорении, когда мы заставляем машину трогаться с места. Положим, например, что под'емная машина весит с грузом 100 килограмм и приводится в движение так, что она получает окончательную скорость, с которой она будет двигаться дальше в 100 сантиметров в секунду, в течение первых $^1/_2$ секунды. Ускорение, т. е. прирост скорости, отнесенный к одной секунде, будет в том случае измеряться 200 сантиметрами в секунду, если 100 в $^1/_2$ секунды, то на одну секунду пришлось бы 200. Сила инерции будет в этом случае: $100 \times 1000 \times 200$ дин

или $\frac{100.1000.200}{1000.981}$ = 20 килограмм приблизительно. Таким образом, в нашем примере сила инерции составляет пятую часть постоянной нагрузки в 100 килограмм. Если же двигатель „рвет с места" еще быстрее и уже через $^1/_4$ секунды сообщает конечную скорость в 100 сантиметров в секунду, то ускорение будет вдвое больше, и следовательно, и сила инерции будет уже 40 килограмм. Подобные расчеты приходится делать в любой машине; вот, например, паровая машина (см. рис. 31), поршень A и стержень B ходит взад и вперед; при этом на стержень B производится не только давление пара, передающееся с поршня A, но и сила инерции всех движущихся частей машины, связанных с этим стержнем. При быстром движении машины, когда скорость движения велика и когда она быстро меняется в тех частях машины, которые ходят взад и вперед — ускорения, а следовательно, и силы инерции очень велики. Поэтому инженерам приходится самым основательным образом подсчитывать силы инерции и рассчитывать части машин так, чтобы они выдержали действие этих добавочных сил. Вернемся теперь к равенству (7). Какой смысл можно придать этому равенству? Сила P_1 есть сила, уравновешивающая отчасти вес груза mg и приводящая его в движение с ускорением a, величина ma есть сила „инерции", т. е. сопротивление груза m, проявляемое в процессе движения. Уравнению (7) можно придать следующий смысл: если мы представим себе движение остановленным и прибавим к действующим силам P_1 и mg силу инерции ma, то у нас получается равновесие, в этом и состоит основное положение механики, носящее название принципа Д'Аламбера, по имени французского математика Д'Аламбера (жил с 1717 по 1783 г.). Итак, это основное положение можно формулировать следующим образом: *Если*

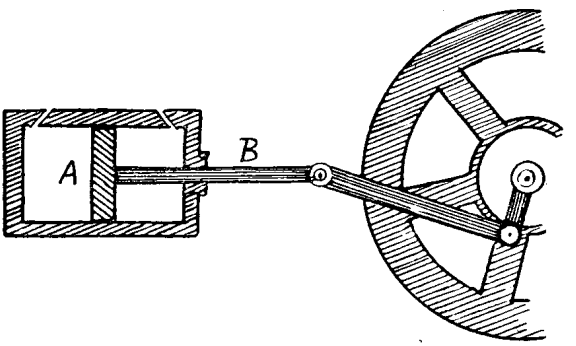


Рис. 31.

движущуюся систему тел остановить и к действующим силам прибавить силы инерции (т. е. произведения из масс на ускорения, направленные в сторону, противоположную ускорению), *то у нас должно получиться равновесие.* Принцип Д'Аламбера, как мы видим, позволяет любую задачу о движении свести к более простой задаче о равновесии. Это, можно сказать, основа всей механики.

Рассмотрим теперь примеры на силы инерции при вращательных движениях—при движениях по кругу.

Положим на стол деревянный кубик А (см. рис. 32) и ударим по нему стержнем СВ, повернув этот стержень из

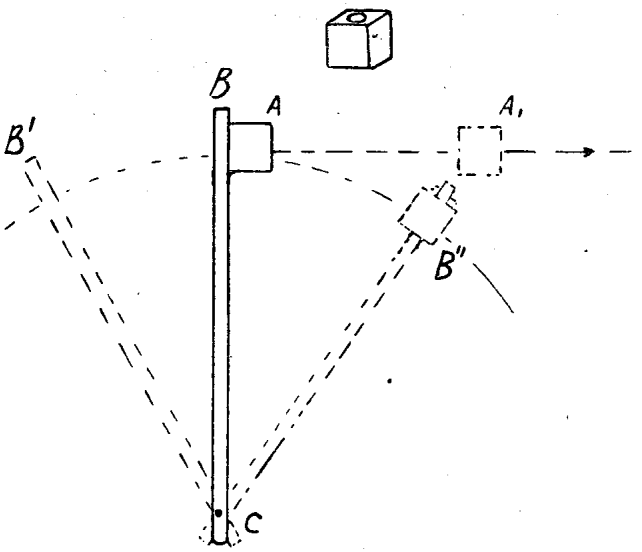


Рис. 32.

положения CB^1 в положение СВ. Кубик А, получив толчок, полетит по прямой AA_1, т. е. по тому направлению, в котором ему был дан толчок. Заметим, что мы ударили кубик А концом стержня В. Если бы не было трения, наш кубик продолжал бы двигаться по линии AA_1, вследствие же трения он остановился в точке A_1; повернем теперь стержень СВ так, чтобы он расположился по направлению CA_1. Мы видим, что теперь между концом стержня В и кубиком A_1 имеется большой промежуток. Почему получается этот промежуток? Потому что стержень *вращается* около точки С и, следовательно,

конец его всегда должен находиться на одном и том же расстоянии от оси вращения; кубик же А, получив толчок, движется по „инерции“ по прямой линии. Теперь нам станет ясным, почему, когда я надену кубик на стержень (в кубике имеется сквозное отверстие) и буду быстро поворачивать стержень вокруг оси С, то кубик будет скользить вдоль стержня, и он соскользнул бы и полетел прочь, если бы мы в конце стержня не укрепили задержки, препятствующей кубику двигаться дальше. Таким образом, чтобы заставить кубик, насаженный на стержень, вращаться вместе со стержнем и оставаться на одном и том же месте стержня, надо привязать к кубику веревку и тянуть его все время вращения к оси вращения или вообще как-нибудь прикрепить его к стержню. Отсюда мы делаем вывод: всякое тело можно заставить двигаться по кругу, но для этого к данному телу надо приложить силу, непрерывно действующую по направлению к центру круга. Так, если мы привяжем камень к веревке и будем его вращать, то мы вполне отчетливо представляем себе и ощущаем ту силу, которую нам для этого необходимо применять. И в этом случае проявляется закон равенства действия и противодействия, потому что вращающийся камень оказывает противодействие нашему стремлению заставить его двигаться по кругу и отклонить его от движения „по инерции“, и он тянет нашу руку прочь от центра по направлению к той точке окружности, где находится в данный момент камень. Это „противодействие“ или эта сила инерции называется „центробежной силой инерции“ или просто центробежной силой. Сила же руки, приложенная к камню, носит название центростремительной силы. Рассмотрим ряд примеров. Вспомним, что мы делаем вполне инстинктивно, не отдавая себе отчета, когда при быстром беге мы хотим сделать крутой поворот: мы наклоняем наше тело к центру той дуги, по которой мы бежим. Стоять в таком наклонном положении мы были бы не в силах. Мы упали бы в ту сторону, куда наклонились, при беге же это необходимо: вес нашего тела, направленный в сторону наклона нашего тела, и дает необходимую для движения по кругу центростремительную силу. Если на железнодорожном пути надо сделать закругление, и если на этом закруглении поезд должен идти все-таки достаточно быстро, то необходимо плоскость, в которой

положены рельсы, сделать наклонной (см. рис. 33 AB). При таком наклонном положении вагонов вес каждого вагона P_0, направленный по отвесу, можно разложить на P_1— силу, направленную перпендикулярно к плоскости AB, в которой уложен рельсовый путь. Эта сила прижимает вагон к рельсовому пути. Другая же слагающая P_2 направлена к центру круга, по которому проложен путь. Эта слагающая и есть та центростремительная сила, благодаря которой только и возможно движение по закруглению; иначе поезд соскочил бы с рельс. На небольших поворотах необходимый наклон вагонов получается благодаря тому, что колеса обточены „на конус". В самом деле, если рельс A будет наружным рельсом, т. е. если центр кривизны пути будет лежать справа от рельса B (рис. 34), то при движении поезд будет „относить" от центра; при этом левое колесо, как видно из чертежа, поднимется, а правое опустится. Куда же будет приложена центробежная сила? Она будет выражаться в давлении поезда на наружный рельс. Точно также, если Вы стоите у окна вагона во время движения поезда по закруглению, и центр круга лежит у Вас за спиной, то Вы чувствуете, как Вас прижимает к стенке, через окно которой Вы смотрите. Давление стенки, препятствующее Вам вылететь — есть центростремительная сила, давление, производимое вашим телом на стенку—есть „центробежная сила инерции" или „противодействие" той силе, которая препятствует Вам вылететь из вагона,—заставляет Вас вместе с поездом двигаться не по прямой, а по кругу. Как центростремительная, так и центробежная силы очень быстро

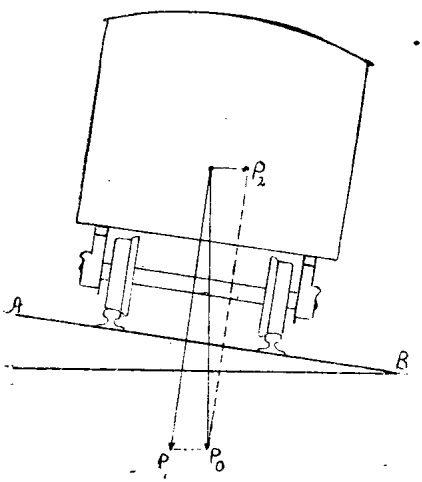


Рис. 33.

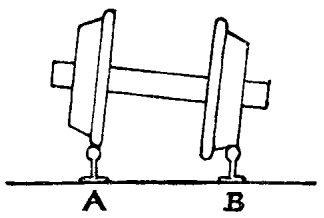


Рис. 34.

возрастают с увеличением скорости движения по кругу: так, если на круге одного и того же радиуса скорость движения возрастает в два или три раза, то эти силы возрастут в четыре и девять раз. Это вытекает из теоретических соображений,

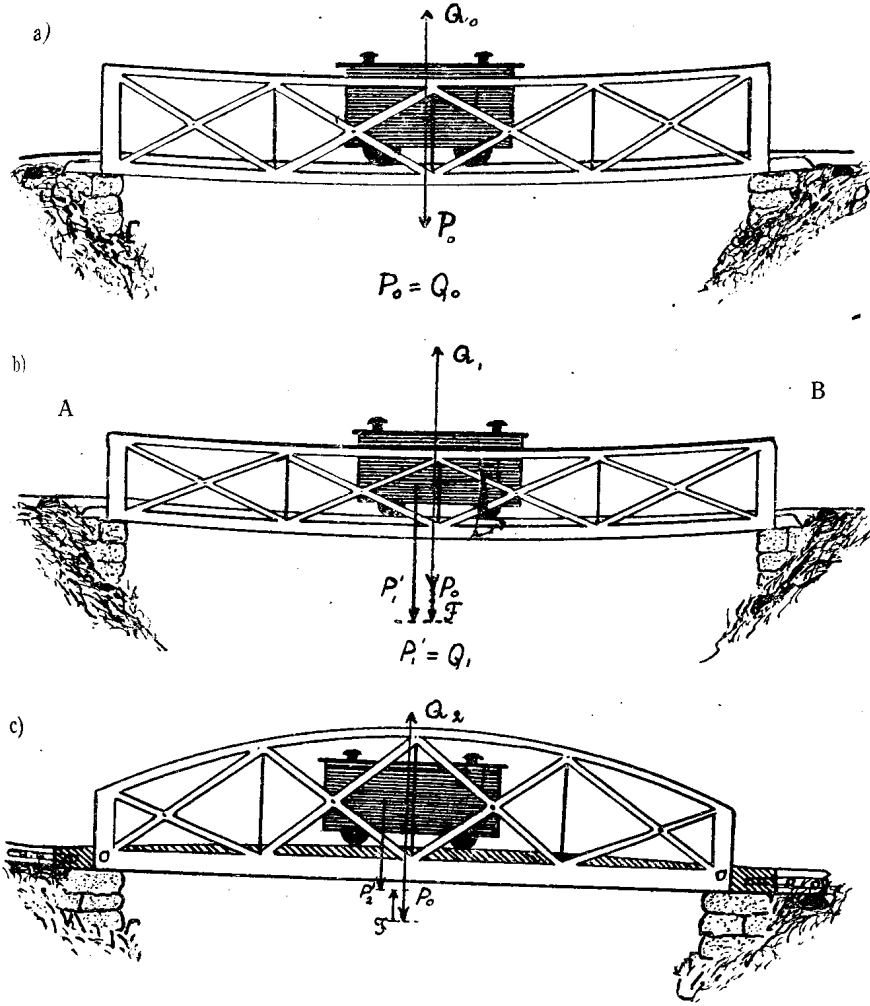


Рис. 35.

вполне подтверждающихся на опыте (об этом у нас еще будет речь), но что центробежная сила действительно очень быстро растет по мере увеличения скорости движения—это знает всякий, кто хоть когда-нибудь вертел камень на веревке вокруг своей руки. При увеличении скорости камень все сильнее и сильнее вырывается из руки.

Рассмотрим теперь движение поезда по мосту, который немного провисает. Всякий мост под грузом поезда немного прогибается. Если поезд стоит, то противодействие моста $Q_0=P_0$ весу поезда. Если поезд движется, то ведь он по существу идет по дуге AB (см. рис. 35в) с центром O, лежащим выше моста, поэтому мост должен действовать на поезд с силой Q_1, большей веса поезда, чтобы дать центростремительную силу, необходимую для движения по дуге AB. Но ведь тогда и поезд должен действовать на мост с „центробежной" силой F, равной центростремительной. Таким образом, увеличенное давление моста на поезд уравновешивается весом P_0+центробежная сила инерции F. Все это показывает, что при движении по прогибающемуся мосту давление поезда на мост будет больше веса поезда на величину центробежной силы F, как мы видели, быстро возрастающей вместе со скоростью движения. Вот почему машинистам всегда вменяется в обязанность убавлять ход поезда на мосту. Если мы искусственно сделаем мост „горбом" (см. рис. 35 с), то при движении поезда давление его будет меньше, чем при неподвижном грузе. Все эти явления были проверены на опыте Генри Джемсом в сороковых годах XIX столетия, по поручению английского парламента, после одного большого железнодорожного несчастия, происшедшего на мосту.

Рассмотрим сейчас еще некоторые практические применения центробежной силы. Положим, что у нас в воде находятся какие-нибудь взвешенные частицы, например, порошок толченого мела. Если мы будем вращать сосуд, например, вот эти две пробирки (рис. 36), укрепленные на оси центробежной машины, то мы, вращая жидкость, этим самым вращаем и взвешенные частицы, но так как эти частицы ничем не удерживаются, то их будет отбрасывать прочь от оси так же, как кубик, скользящий по стержню, отбрасывался от оси вращения. Осадок будет собираться на дне пробирок. Увеличивая скорость и продолжительность вращения, можно добиться того, что даже мельчайшие частицы осядут на дно пробирок. Сначала осядут более крупные, а потом постепенно будут оседать все более мелкие и мелкие порошинки. Этим способом можно производить очень точные разделения порошков по размерам порошинок и получать однородные порошки с зернами одинаковых размеров. Этим способом

„центрифугирования" (центрифуг значит—бегущий от центра) широко пользуются в медицине при исследованиях крови для отделения кровяных шариков, а также при анализе мочи для отделения и анализа осадков. Этим же способом об'ясняется распределение жидкостей ртути воды и масла во вращающемся стеклянном шаре (см. рис. 37). Рассмотрим еще пример с центробежным регулятором паровой машины (см. рис. 38): при увеличении скорости вращения шарики регулятора a относятся в сторону от оси вращения: их удерживает пружина; чем быстрее вращение, тем сильнее сжимается пружина Р, и тем дальше отходят шарики от оси, и тем выше поднимается муфта С. Если мы с этой муфтой соединим заслонку в трубе Д, подводящей пар из котла к паровой машине, и устроим так, что при некотором положении муфты С труба будет закрыта, то этим мы приостановим приток пара, и машина начнет замедлять свой ход; тогда пружина оттянет муфту вниз и приоткроет заслонку: машина опять начнет ускоряться; таким образом, можно добиться того, чтобы машина шла с постоянной скоростью—давала постоянное число оборотов. Точно также, если случайно уменьшится нагрузка машины, например, оборвется приводной ремень, отчего число оборотов сразу должно будет сильно возрасти, отброшенные в сторону увеличенным числом оборотов шарики регулятора приподнимут муфт у С и прекратят доступ пара. Мы опять видим яркий пример, как знание законов центробежной силы приводит нас к тому, что мы эту силу

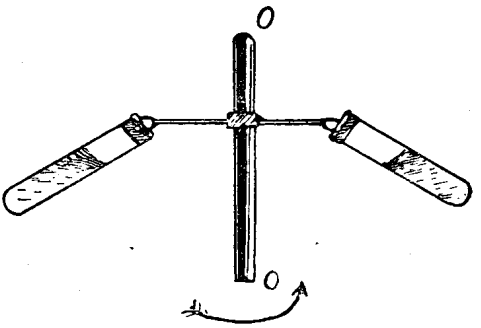


Рис. 36.

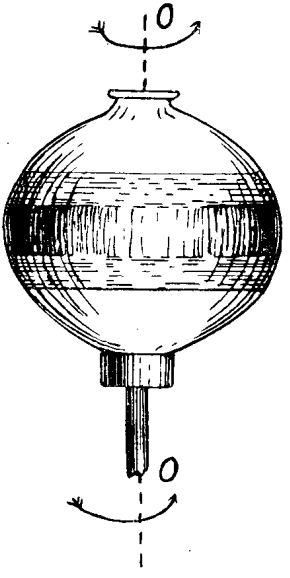


Рис. 37.

заставляем предотвращать опасные последствия этой же самой центробежной силы! При очень большой скорости большое маховое колесо может разлететься вдребезги, так как для отклонения от прямолинейного движения по инерции частей обода колеса потребуется очень большая сила, колесо может не выдержать этого натяжения и части обода разлетятся в разные стороны. При разрыве маховых колес, а это не раз случалось, происходят страшные разрушения. Части колес при этих случаях отлетают на несколько верст от места несчастия.

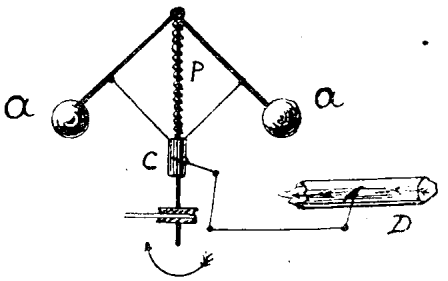


Рис. 38.

Попробуем [1]) теперь посмотреть, как высчитывают эти силы инерции, проявляющиеся при движении по кругу. Важность такого расчета для всех Вас, я думаю, не подлежит сомнению после приведенных примеров. Мы видели, что для того, чтобы заставить какое-либо тело двигаться по кругу, надо приложить к нему постоянную силу, направленную к центру, величина которой зависит от числа оборотов и размеров поперечника круга, по которому происходит движение. Выполняется ли вторая аксиома Ньютона? На первый взгляд кажется, что нет. Ведь, в самом деле, мы рассматривали равномерное движение по кругу с неизменной скоростью по окружности. Раз скорость не меняется, то ускорение равно нулю, а если ускорение равно нулю, то по второй аксиоме и сила равна нулю. В чем же здесь дело? В нашем рассуждении мы забыли, что скорость определяется не только числовым значением, но и направлением. Если, например, вращающийся на нитке камень сорвется с нитки, в момент, когда он находился в точке A окружности (рис. 39), то он полетит по направлению касательной в точке A, т. е. по линии AA^1 (касательной к кругу мы называем такую линию, которая касается его в одной точке: если я колесо поставлю на доску, то доска будет направлена по касатель-

[1]) Эту часть лекции читатель, которого еще затрудняют алгебраические формулы, может пропустить.

ной к окружности обода колеса в том месте, где обод прикасается к доске). Если нитка оборвется, когда груз находится в положении B, то камень полетит по касательной в точке B, т. е. полетит по линии BB^1. Отсюда ясно, что направление скорости непрерывно меняется, поэтому и нельзя говорить, что скорость остается неизменной только потому, что числовая величина скорости не меняется; мы ведь видели, изучая сложение сил (см. III лекцию), что при сложении двух равных сил получающаяся равнодействующая по величине может равняться той же самой величине, что и любая из составляющих, только она имеет другое направление.

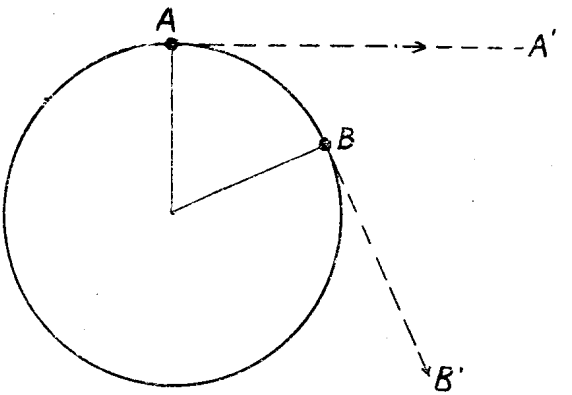


Рис. 39.

Что касается величины скорости, то ее получить не трудно: надо взять длину окружности круга и разделить на число секунд, или на число долей секунды, в течение которых движущееся по окружности тело обойдет один раз полный круг.

Если радиус круга обозначим через r, то в геометрии доказывается, что длина окружности будет $2\pi r$, где число $\pi=3{,}14\ldots$ Тем, кто еще незнаком с этими вопросами геометрии, полезно проделать следующие опыты: взять несколько круглых цилиндров разных размеров, измерить их поперечники или диаметры 2r, где r радиус, затем с помощью бумажки определить длины окружностей и смерить линейкой. Если для каждого цилиндра мы смерим длину окружности и разделим на длину удвоенного радиуса, т. е. на длину поперечника, то мы получим число π, т. е. 3,14 . . . с большей или меньшей точностью, в зависимости от тщательности наших измерений.

Итак, величина скорости V выражается отношением пройденного пути $2\pi r$ ко времени, в течение которого этот

путь был пройден, или $V=\frac{2\pi}{T}r$ . . . (9), где T время одного оборота. Если во время T секунд был пройден путь $2\pi r$, то скорость, показывающая путь, пройденный в одну секунду, будет в T раз меньше. Заметим, что T может быть целым числом или какой угодно дробью.

Величину $\frac{2\pi}{T}$ часто называют угловой скоростью. Ясно, что это есть скорость в том случае, когда мы длину радиуса считаем равной единице. Действительно, положив в (9) $r=1$ мы получаем $V_0=\frac{2\pi}{T}=a_0$ . . . . (9¹). Итак, скорость при равномерном движении по кругу какого угодно радиуса можно считать равной произведению угловой скорости a_0 на радиус : $V=a_0 . r$ . . . . (10).

Теперь посмотрим следующий чертеж. Пусть (см. рис. 40) 0 изображает центр круга, по которому происходит движение; изобразим рядом, на другом чертеже, скорость, какую имеет тело, двигающееся по этому кругу по величине и по направлению в тот момент, когда тело находится в A: мы должны от некоторой точки O_1 отложить отрезок O_1A, численно равный скорости V, а направление должны взять совпадающее с направлением касательной в точке A круга радиуса r. Дальше делаем такое же построение для положения движущегося тела B и C. Мы видим, что концы отрезков, изображающих скорости, т. е. A, B и C лежат на окружности радиуса V. Если мы будем следить за непрерывным движением данного тела по окружности радиуса r, то конец отрезка, изображающего скорость за время одного оборота T, обойдет один раз окружность радиуса V. Задача об определении ускорения, т. е. прироста скорости в одну секунду, или „скорости изменения скорости", приводится к определе-

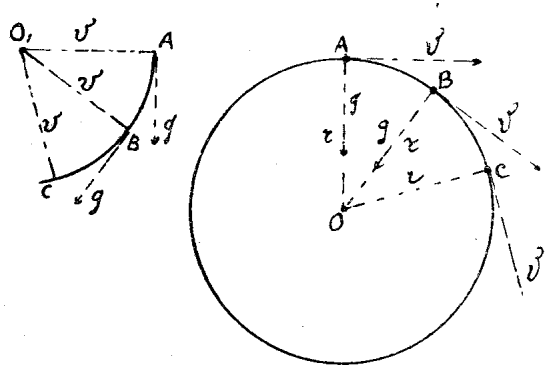


Рис. 40.

нию величины скорости при движении по кругу радиуса V на вспомогательном чертеже [1]). Мы уже видели, как определяется скорость при движении по кругу. В данном случае ускорение g, или скорость изменения скорости, будет равна $\frac{2\pi}{T}$. V или $g = \frac{2\pi}{T}$. V, или принимая во внимание $V = a_0 r$, $g = a^2_0 r$ (10[1]), т. е. ускорение равно квадрату угловой скорости, умноженной на радиус. Так как всякая скорость при движении по кругу в каждый данный момент перпендикулярна к радиусу, то, следовательно, и g направлено перпендикулярно к V; перенося g на рис. 40 на первый чертеж, мы видим, что ускорение направлено к центру, т. е. туда, куда направлена центростремительная сила. Итак, и вторая аксиома Ньютона здесь удовлетворяется. Центростремительная сила $F = m \cdot a^2_0 r$ . . . (11).

Это следствие легко проверить на опыте. На вращающемся горизонтальном стержне имеются подвижные грузы m и m_1, причем m в два раза больше m_1; оба груза связаны веревкой (см. рис. 41). Если мы расстояния a и a_1 подберем так, что произведения $ma = m_1 a_1$, то как центробежная, так и центростремительная силы будут одинаковы, так как ведь угловые скорости у того и другого груза будут одинаковы: оба груза находятся на одном и том же вращающемся стержне. Зависимость от угловой скорости можно проверить на вращающихся пружинных весах, с перемещающимся на трении вторым указателем a (см. рис. 42), показывающим, насколько вытянут был связанный с пружиной указатель пружинных весов. Если знать массу груза, действующего на пружинные весы, знать расстояние груза от оси, вращение и число оборотов центробежной машины, то можно вычислить вели-

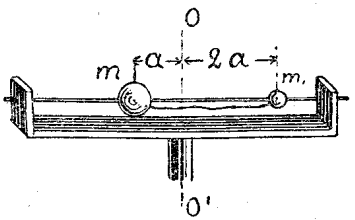


Рис. 41.

[1]) В самом деле, чтобы получить скорость O_1B из скорости O_1A, надо к O_1A *геометрически* прибавить „прирост скорости“ A_1B, что при условии малого угла между O_1A и O_1B можно заменить дугой AB. Но нам надо ведь знать величину ускорения—т. е. отношение прироста скорости к времени—иначе отношение AB к t, а это и есть скорость движения A по кругу радиуса V.

чину F по формуле 11 и сверить с показанием весов. Расчет производится следующим образом. Если счетчик оборотов (каждые 100 оборотов дающий звонок) показал, что 100 оборотов были сделаны в 20 секунд, то это значит, что в одну секунду было сделано 5 оборотов; следовательно, на один оборот потребовалась 1/5 секунды. Разделив 2π или 6,28 . . . на 1/5 или умножив на 5, получаем 31,4—угловую скорость. Умножив угловую скорость самое на себя, на массу вращающегося тела, выраженную в граммах, и на длину радиуса, выраженную в сантиметрах, мы получим величину центробежной, или равной ей центростремительной, силы в динах, а разделив на 981 или для круглого счета на 1000 получаем силу в килограммах. Решим задачу: гиря в 1 килограмм, привязанная на веревке, вращается по кругу в 50 сантиметров радиусом, причем 1 оборот происходит в $^1/_4$ секунды.

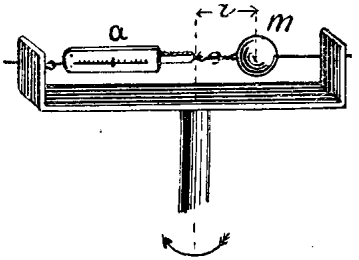


Рис. 42.

Надо $2\pi=6{,}28$ разделить на $^1/_4$: 6,28 . 4=25,12. Итак, угловая скорость равна 25,12. Квадрат угловой скорости будет приблизительно равен 625. Отсюда центростремительная сила, выраженная в динах, будет $m \cdot r\, a^2_0 = 1000 \times 50 \times 625$, а выраженная в килограммах будет $\frac{1000.50.625}{981.1000} = 31{,}8$ килограмма, т. е. около 2 пудов. Этот расчет показывает, с какой осторожностью надо строить машины, в которых имеются массивные вращающиеся части.

ЛЕКЦИЯ ШЕСТАЯ

СОДЕРЖАНИЕ.

Всемирное тяготение. Сила тяжести и всемирное тяготение. Опыт Кавéндиша. Как можно определить массу земного шара. Как доказать вращение земного шара. Маятник Фуко. История земного шара.

При измерении сил с помощью пружинных весов мы обыкновенно сравниваем измеряемую силу с силой тяжести. В самом деле, на практике мы всегда пользуемся „весовыми" единицами силы—килограммами или их долями, и это делается потому, что сила тяжести, так сказать, у нас всегда под рукой. Но что представляет собой эта сила тяжести? Отчего все тела падают на землю? Отчего все тела имеют вес? Попытку подойти к решению этого вопроса сделал Ньютон, хотя он и сам признавал, что сделанное им в этом направлении—только первый шаг, за которым, однако—мы можем теперь прибавить—вплоть до наших дней еще не последовали другие [1]). Шаг, сделанный Ньютоном, сводится к следующему: всякие две массы из какого бы рода вещества они ни состояли, притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадратам расстояний между этими двумя массами. Разберем поближе, что это значит. Положим, что у нас имеются два маленьких шарика A и B (рис. 43) с массами m и m_1 грамм

[1]) Теорию Эйнштейна нельзя считать решением задачи, так как подход Эйнштейна чисто формальный—математический. Об'яснения самого явления в том смысле, как это привыкли понимать в физике, в теории относительности не дается.

(это могут быть и малые доли грамма), и пусть они находятся на расстоянии r сантиметров друг от друга. Согласно предположению Ньютона A будет притягивать к себе B с некоторой силой F_1 и B будет притягивать к себе A с силой такой же величины F_2. Если мы теперь раздвинем наши шарики на вдвое большее расстояние 2r, не изменяя их масс, то, по Ньютону, силы F_1 и F_2 должны убавиться в 4 раза: расстояние увеличилось в 2 раза—сила убавилась в 4. Если мы увеличим расстояние в 3 раза, то сила уменьшится в 9 раз и т. д. Если теперь мы, не изменяя расстояния между шариками, заменим один из них, скажем, A другим шариком A_1 с вдвое большей массой, то силы F_1 и F_2 возрастут вдвое. Вот собственно в чем заключается смысл утверждения Ньютона, что взаимное притяжение двух тел прямо пропорционально их массам и обратно пропорционально квадрату расстояния. Прежде, чем выяснить, как была произведена проверка этой гипотезы Ньютона на опыте, мы остановимся еще на одном выводе, который был сделан Ньютоном из его гипотезы. Положим, что у нас имеются два больших шара—пусть расстояние между центрами O и O^1 (см. рис. 44) равно R санти-

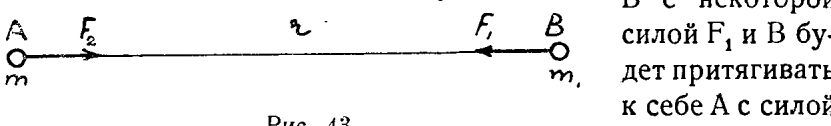


Рис. 43.

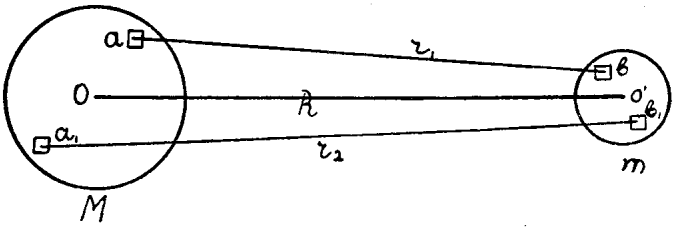


Рис. 44.

метров, а масса их M и m. Что взять в данном случае за расстояние между шарами? Этот вопрос мы не ставили себе в первом примере, потому что размеры шариков были по нашему предположению очень малы по сравнению с их расстоянием друг от друга. В самом деле, например, небольшая часть массы первого шара *a* (рис. 44) расположена ближе к *b*, чем такая же частица в O отстоит от O^1 и, наоборот, между частями a_1 и

$в_1$ расстояние r_2 будет больше, чем OO^1. Ньютон теоретически показал, что для подсчета взаимного притяжения наших двух шаров надо взять массы шаров и считать, что вся их масса как бы сосредоточена в центре, а расстояние надо считать от центра до центра. Теоретический подсчет довольно длинен, но можно все-таки об'яснить себе, почему получается именно такой результат. Расстояние между a и $в$ меньше, поэтому сила притяжения должна быть больше, чем между частицами вещества, расположенными вблизи центров O и O^1. Наоборот, частицы a_1 и $в_1$ будут притягиваться слабее. При общем подсчете должен получиться некоторый средний результат: строгое вычисление Ньютона приводит именно к указанному результату, т. е. этот средний результат будет такой, как будто все части одного шара отстоят от всех частей другого шара на расстоянии, равном расстоянию между центрами шаров.

Это обстоятельство показывает, что производить опыты с притяжением следует всегда с телами шарообразной формы. Проверка закона Ньютона была произведена впервые английским физиком Кавендишем (род. 1731, ум. 1810) следующим образом. На тонком стержне с зеркальцем d (рис. 45) укрепляются маленькие шарики a, a_1 массы m: стержень подвешивается на очень тонкой нитке (см. рис. 45—I). К шарам a и a_1 пододвигают большие свинцовые шары A и A_1 массы M. Притяжение шаров a и a_1 шарами A и A_1 (см. рис. 45—II) вызывает поворот стержня вокруг нитки, на которой он подвешен—нитка закручивается. Величину же поворота можно с большой точностью определить, заставляя отражаться луч света от зеркальца d и падать на линейку с делениями. Малейший поворот стержня вызывает значительное смещение пятнышка, образованного на линейке отраженным пучком света. Этим способом можно проверить все предположения Ньютона. В самом деле, можно изменять массы шаров A и A_1, не изменяя расстояния между центрами Aa и A_1a_1, тогда величина поворота стержня должна измениться в прямом отношении к изменению масс. Если массы увеличились в два раза, то и сила увеличится в два раза. Точно также, сохраняя массы неизменными и меняя одни только расстояния Aa и A_1a_1 (а этого можно достигнуть, придвигая и отодвигая шары A и A_1 к висящему стержню с шариками a и a_1

на концах), можно показать, что сила притяжения—величина поворота стержня С—обратно пропорциональна квадрату расстояния. Но опыт Кавендиша дает и нечто большее. Он поз-

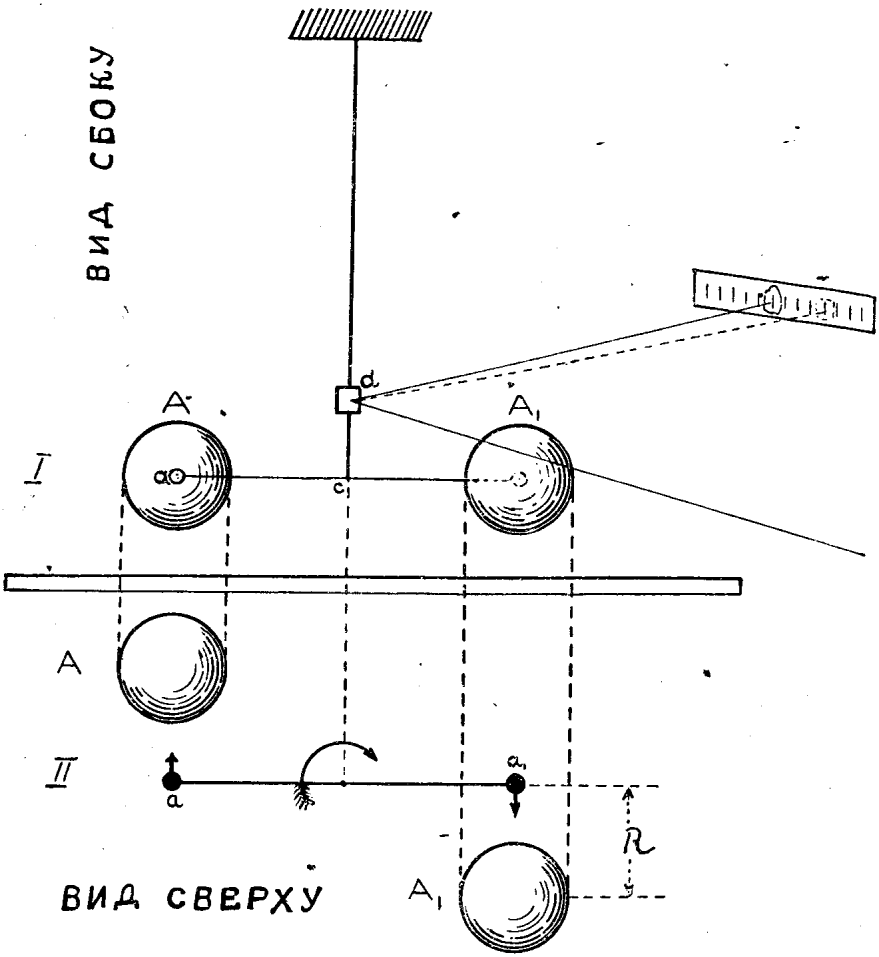


Рис. 45.

воляет определить, с какой силой 1 грамм массы притягивается массой в любое число грамм, находящейся на определенном от него расстоянии, а, сравнивая найденную силу с весом одного грамма (что, как мы видели, равно 981 дине, см. лекцию IV), мы можем найти, во сколько раз сильнее притягивается данная масса в 1 грамм земным шаром и вычислить отсюда массу всего земного шара. По этой причине часто опыт Кавендиша называют „взвешиванием зем-

ного шара". Рассмотрим поближе ход самых вычислений—эти вычисления очень несложны. Пусть мы имеем два шарика a и a_1, на концах стержня C с массой по 1 грамму каждый; пусть вместо шаров A и A_1 мы пододвигаем шары с массой, также равной 1 грамму, и помещаем их так, что расстояния между центрами aA и a_1A_1 равны одному сантиметру. Обозначим силу притяжения, действующую на каждый из шариков a и a_1, через K, отодвинем теперь шары A и A_1 так, чтобы расстояния aA и a_1A_1 стали в r раз больше. Тогда сила притяжения убавится в r^2 раз и мы будем иметь $\frac{K}{r^2}$. Теперь заменим A и A_1 с массами в 1 грамм большими шарами с массами M_1, но так, чтобы расстояние между центрами Aa и A_1a_1 оставалось равным r, тогда сила притяжения должна возрасти в M_1 раз. Мы имеем, следовательно, $F=\frac{KM_1}{r^2}$. Если мы теперь и массы a и a_1, которые по предположению равнялись 1 грамму, заменим массами по m_1 грамм, то сила притяжения получится равной:

$$F=\frac{KM_1 m_1}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots (A)$$

Это и есть уравнение, выражающее гипотезу Ньютона, которая непосредственно впервые была проверена лабораторными опытами Кавендиша—о той проверке, которую сделал сам Ньютон, у нас речь будет впереди.

Какой физический смысл в формуле (A) представляет собой коэффициент K? Наш вывод показывает, что это есть сила, с которой масса в 1 грамм притягивает другой грамм, помещенный на расстоянии одного сантиметра (предполагается, что обе массы в 1 грамм шарообразны, и расстояние между центрами их равно 1 сантиметру). Из опыта Кавендиша, зная массы a, a_1, A, A_1 и расстояния a_1A_1 и aA (см. рис. 45, I, II), можно найти величину K, если нам будет известна сила притяжения между a_1 и A_1 и между a и A. Эти силы производят закручивание нити, на которой висит стержень C с массами a и a_1. Как по величине закручивания можно определить величину закручивающей силы, ясно из следующего рассуждения. Представим себе, что к шарикам a и a_1 привязаны тонкие нитки, перекинутые через блоки P_1 и P (рис. 46); к концам ниток привязаны грузики Q и Q_1. Можно всегда подобрать величину грузов так, чтобы они

производили такое же закручивание нити, какое производят силы притяжения шаров A и A_1. Таким образом, это притяжение можно выразить в граммах или в динах. Опыты Кавендиша, повторенные потом много раз другими исследователями с еще большей тщательностью и более усовершенствованной техникой, дали следующий результат. Величина K (т. е. сила, с которой 1 грамм притягивает другой грамм, помещенный на расстоянии 1 сантиметра), выраженная в динах, изображается числом 6,67, деленным на 1 с восемью нулями. Такие дроби обыкновенно пишутся следующим образом: 10^{-8}, где 8 показывает число нулей, а знак— указывает на то, что речь идет о дроби, числитель которой равен единице, а знаменатель—единица с указанным числом нулей. Итак, K равняется $6{,}67 \times 10^{-8}$ дины. Теперь представим себе, что шарик с массой в 1 грамм лежит на поверхности земли. Вес в 1 грамм, выраженный в динах, будет равняться, как мы видели, 981 дине (см. лекцию IV). Как выразить эту силу, пользуясь формулой Ньютона?

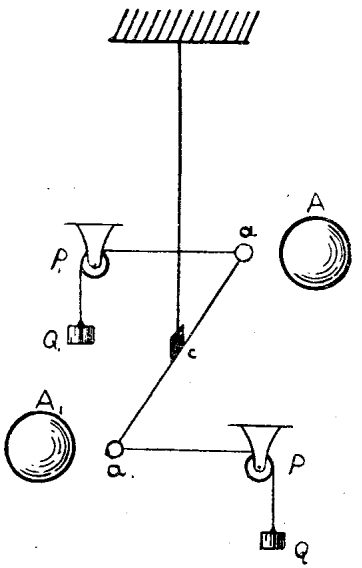


Рис. 46.

По Ньютону земной шар массы M, которую мы должны определить, притягивает так, как будто вся масса его сосредоточена в центре земли. Расстояние от центра земли до поверхности, т. е. радиус R земли равняется 6370 километров. Таким образом, в формуле (A) надо вместо F подставить 981, вместо r^2 квадрат радиуса земли R^2 (его надо выразить в сантиметрах, т. е. 6370 надо умножить на 1000 и на 100 и умножить самого на себя), вместо K подставить найденную из опыта Кавендиша величину, вместо $m_1=1$ грамм; тогда у нас остается одна только неизвестная величина M— масса земли. Итак, имеем:

$$981 = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot M}{(6370 \cdot 1000 \cdot 100)^2} \text{ или}$$

$$M = \frac{981 \cdot (6370 \cdot 1000 \cdot 100)^2}{6.67 \cdot 10^{-8}}$$

откуда для M находим: $M=5{,}9 \cdot 10^{27}$ грамм или $=5{,}9.10^{24}$ килограмм, т. е. 59 с двадцатью тремя нулями! Словами это выразится так: масса земного шара равняется пяти миллионам девятистам тысячам миллиардов миллиардов килограмм! Конечно, наглядно представить себе эту цифру очень трудно, хотя в последние месяцы существования совзнаков мы и привыкли действовать с астрономическими цифрами [1]). Во всяком случае, для нас теперь понятно, почему прибор Кавендиша можно назвать весами для взвешивания земного шара.

Но как бы убедителен опыт Кавендиша ни был, у нас все-таки может возникнуть сомнение. Если верен закон Ньютона, выраженный формулой (A), то это значит, чем выше мы поднимаем какой-либо предмет над уровнем земли, тем меньше его должна притягивать земля, тем меньше должен становиться его вес, а между тем мы видели на Атвудовой машине, что в отсутствии добавочного груза m, вызывавшего движение, равновесие соблюдалось независимо от того, висели ли оба груза M_1 и M_2 на одной высоте или нет. А казалось бы, что тот груз, который висит ниже, должен бы перетягивать, так как он ближе к центру земли? Это противоречие было разрешено тщательными опытами с очень чув-

[1]) (Товарищи, затрудняющиеся математическими расчетами, могут это примечание пропустить).

Для интересующихся приводим простейший (теоретически) способ измерения радиуса земного шара, примененный на практике впервые Эратосфеном, примерно 2160 лет тому назад. Эратосфен заметил, что в те дни, когда солнце в полдень стояло в зените, т. е. прямо над головой—на продолжении отвесной линии в городе Сиенне, в Египте—в г. Александрии, расположенном на север от Сиенны на расстоянии AS (см. рис. 47), лучи солнца образовывали угол a с отвесной линией. Так как солнце лежит очень далеко от нас, то лучи его, идущие в Сиенну и Александрию, можно считать параллельными; а если так, то измеренный в Александрии в полдень угол при точке A (см. рис. 47) должен равняться углу AOS. Дуга AS непосредственно измерена—это ведь расстояние между двумя данными городами. С другой стороны, из геометрии известно, что длина дуги AS будет во столько раз меньше всей окружности $2\pi R$ (поперечник, умноженный на число $\pi=3{,}14$.), во сколько число градусов в угле a меньше 360. Итак $\frac{AS}{2\pi R}=\frac{a}{360}$, откуда, зная число градусов в угле a и расстояние между городами AS, можно найти $R=\frac{AS \cdot 360}{2\pi a}$. Угол a, как мы видели, есть угол между лучом, идущим от солнца, и отвесной линией в Александрии в полдень в тот день, когда в Сиенне лучи солнца попадают на дно глубокого колодца. Так как нам, к сожалению, в точности неизвестны употреблявшиеся в то время меры длины, т. н. „стадии", то мы не можем сказать, насколько близко подходит число, найденное Эратосфеном, к 6370 километрам, т. е. числу, найденному с помощью позднейших более точных приемов измерения земного шара.

ствительными весами с четырьмя чашками, схематическое изображение которых приведено на рис. 48. К очень чувствительным весам с чашками P_0Q_0 на тонких проволоках,

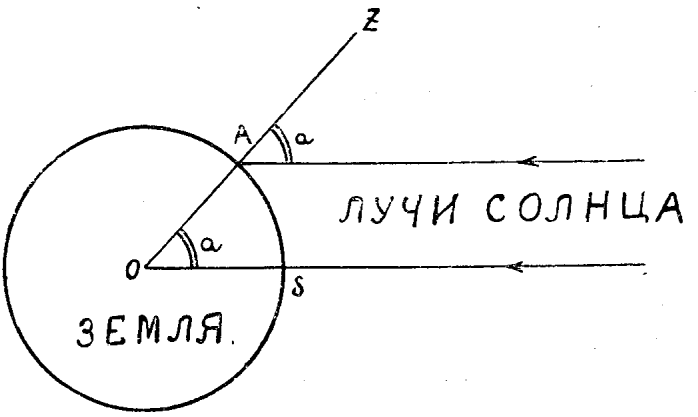


Рис. 47.

длиною в несколько метров, подвешена другая пара чашек P_1 и Q_1. Если мы уравновесим груз P_0 известным количеством разновеса Q_0 на верхних чашках, то равновесие не нарушается, если перенести оба груза на нижние чашки. Но если мы, оставив один из грузов на верхней чашке, перенесем другой на нижнюю, то последний будет всегда немного перетягивать, вследствие того, что он ближе к центру земли. Однако, эта разница очень мала; чтобы ее заметить, надо иметь, во-первых, очень чувствительные весы, и, кроме того, надо, чтобы в том помещении—в той трубе, в которой висят чашки на проволоках в несколько метров длиной, не было совершенно движения воздуха, иначе чашки чувствительных весов так сильно качаются, что ничего решительно нельзя на них уравновесить. Отсюда ясно, что на атвудовой

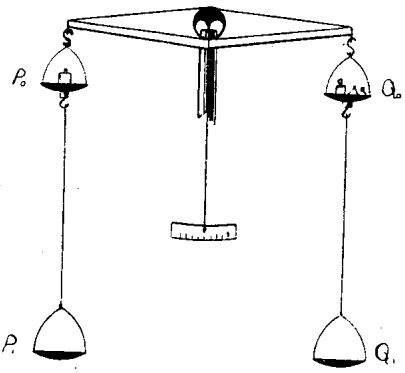


Рис. 48.

машине такое малое различие в весе грузов, висящих на различной высоте, не может повернуть блоки. А небольшое различие в весе, в свою очередь, об'ясняется тем, что изменение в высоте на несколько метров по сравнению с величиной радиуса земли в 6370 километров—величина очень малая. Подсчет по формуле (А) находится в полном согласии с только что изложенными опытами. Таким образом, противоречие разрешается.

Рассмотрим теперь, почему в разных местах земного шара сила тяжести не одинакова.

Прежде всего сделаем опыт. На центробежную машину укрепляется стержень АВ (рис. 49), на котором насажено несколько колец. Кольца имеют форму кругов. Если мы будем медленно вращать ось АВ, то вращающиеся кольца дадут нам впечатление шара. Однако, по мере увеличения скорости вращения, шар начинает сплющиваться и принимает форму так называемого „эллипсоида вращения" CD. Сплющивание происходит вследствие того, что лежащие на „экваторе" нашего шара части колец CD „по инерции" относятся от оси вращения, вследствие этого кольца изгибаются, от этого вызываются упругие силы согнутых железных колец, которые и не позволяют частям CD удалиться от оси дальше некоторого предела. Наступает некоторое состояние равновесия, когда упругая сила согнутых колец как раз уравновешивает силу, с которой части CD стремятся еще больше согнуть кольца. Чем быстрее вращение, тем сильнее сплющивание, поэтому получающиеся формы вращающегося тела называются „формами равновесия". Каждой скорости вращения соответствует своя форма равновесия. Земной шар имеет как раз такую форму слегка сплюснутого шара—т. е. эллипсоида вращения. Эта форма получилась от того, что земной шар первоначально был в расплавленном—жидком состоянии,

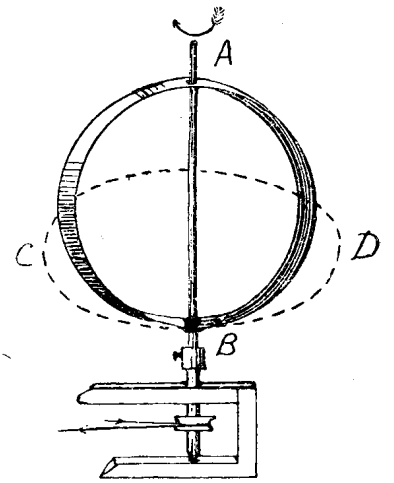


Рис. 49.

и при этом он вращался, как и сейчас, вокруг своей оси. Роль упругой силы в нашей модели с кольцами играет сила взаимного притяжения частиц, из которых состоит земной шар. Какие следствия вытекают из того, что земля имеет только что указанную форму, и из того, что она вращается? Прежде всего, места, лежащие вблизи оси вращения на поверхности земли, т. е. вблизи полюсов, вследствие сплюснутой формы, лежат ближе к центру земли, чем места на экваторе CD. Поэтому сила тяжести должна быть немного больше у полюсов, чем у экватора—это первая причина, почему сила тяжести неодинакова во всех частях земного шара. С другой стороны, вследствие вращения земного шара вокруг оси, мы должны наблюдать те же явления, какие наблюдаются на вращающихся вокруг оси телах. Так любое тело m, лежащее на экваторе, описывает в 24 часа круг радиуса R, равного радиусу земли. Получается такое же действие, как у поезда, идущего по мосту не провисающему, а, наоборот, выпуклому (см. лекцию V). При движении по такому мосту давление поезда на мост будет меньше, чем если бы поезд стоял на мосту и не двигался. Точно также и всякое тело, находящееся на вращающейся земле, вследствие ее вращения производит меньшее давление на нее. Таким образом, именно вследствие вращения земли на экваторе, сила притяжения земли будет ослаблена—она будет меньше, чем на полюсах—это вторая причина, почему сила тяжести неодинакова на экваторе и на полюсах. Но обе указанные причины, действуя вместе, вызывают очень небольшое различие. Так, ускорение силы тяжести для полюса выражается числом 983, а для экватора 978. Для промежуточных широт, как, например, для Москвы мы имеем 981,6 [1]). Что влияние вращения земли всего сильнее на экваторе, ясно из того, что все части земли хотя и поворачиваются в 24 часа, но чем ближе к полюсу A (см. рис. 50), тем меньше радиус круга r, по которому они движутся и тем, следовательно, меньше центростремительная и центробежная сила (см. лекцию V).

---

[1]) Напомним, что под ускорением при свободном падении мы разумеем прибавление скорости в каждую единицу времени, ускорение в 983 означает, что в каждую секунду скорость нарастает на 983 сантиметра в секунду.

Посмотрим теперь, как можно физическим опытом, не выходя из нашей аудитории, доказать, что земной шар вращается. Опыт этот впервые был выполнен французским физиком Фуко в 1851 году. Я прежде покажу Вам модель, на которой наглядно можно будет об'яснить, в чем заключается опыт, а потом воспроизведу и самый опыт. На вращающемся диске А (рис. 51) укреплена дуга В, к вершине которой подвешен маятник С. Если мы заставим качаться маятник в плоскости дуги, как показано на рисунке, и будем поворачивать диск вместе с дугой, то плоскость качания остается в прежнем положении: маятник по прежнему качается по направлению от меня к Вам; он не поворачивается вместе с дугой В и диском А.

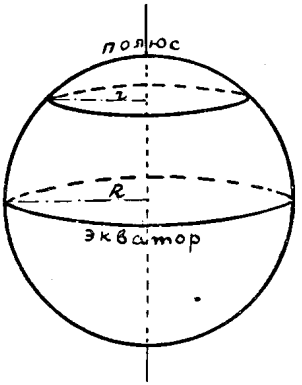


Рис. 50.

Теперь представим себе, что мы находимся на северном полюсе и как раз над концом земной оси устроили дугу с маятником. Мы не замечаем собственного вращения вместе с земным шаром, и потому нам будет казаться, что плоскость качания маятника поворачивается в противоположную действительному вращению сторону. То же произошло бы с наблюдателем, которого мы вообразили бы находящимся на диске нашей модели, и который не замечал бы своего собственного вращения. Подобное этому явление произойдет и не на самом полюсе.

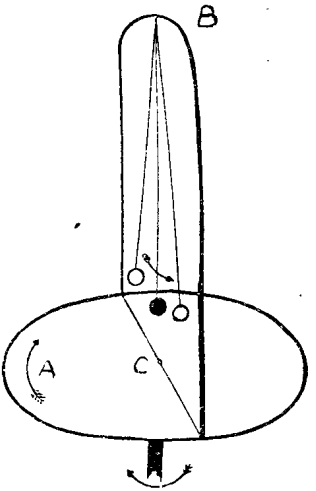


Рис. 51.

На глобусе (см. рис. 52) мы накололи две карточки, которые изображают нам плоскость дуги, к которой прикреплен маятник. Ясно, что при вращении земного шара карточка А должна перейти в положение, занимаемое карточкой В; ясно также, что при этом перемещении карточка должна повернуться около оси аА, а так как маятник,

как мы видели, сохраняет направление той плоскости, в которой он качается, то через некоторое время мы увидим расхождения плоскости качания маятника и плоскости, в которой расположена дуга. Этот опыт мы воспроизведем сейчас в аудитории. Мы отводим тяжелый шар O, висящий на тонкой стальной проволоке, в сторону, подхватываем его веревочной петлей (см. рис. 53 и 54), затемняем аудиторию и освещаем проволоку светом фонаря. Там, где получается тень от проволоки, укрепляется на стене полоска черной бумаги n. Фонарь устанавливается так, чтобы вначале, когда маятник висел спокойно и еще не был

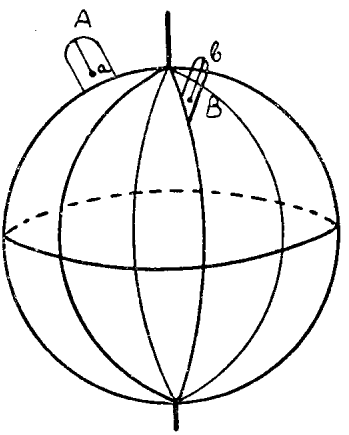


Рис. 52.

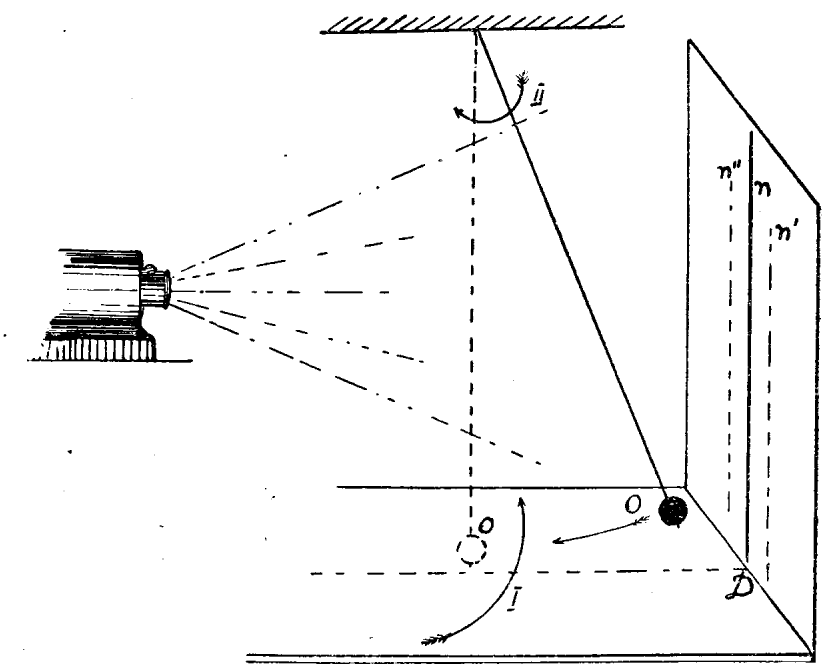


Рис. 53.

отведен в сторону, тень проволоки приходилась бы в том же самом месте. Благодаря этому, когда мы пережжем нитку, укрепля-

ющую отведенный в сторону маятник, он будет колебаться так, что тень проволоки все время будет совпадать с полоской черной бумаги n. Так как земля поворачивается от запада к востоку, то вся наша аудитория будет поворачиваться по стрелке I. Мы этого движения не ощущаем и нам будет казаться, что плоскость качания маятника поворачивается в обратную сторону, т. е. по стрелке II. Как мы это заметим? Мы будем замечать, что, при приближении маятника к стене, его тень начнет все более и более отходить в сторону n', когда же маятник удаляется от стены, то тень его смещается в противоположную сторону n''. Это смещение происходит очень медленно, и, чтобы заметить это явление, нам пришлось подождать несколько минут. Об'ясняется это тем, что земля

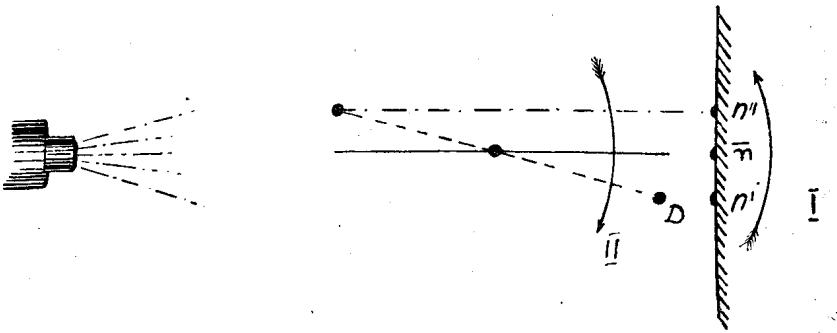


Рис. 54.

очень медленно поворачивается: она один полный оборот делает в 24 часа, т. е. она вертится вдвое медленнее, чем часовая стрелка часов.

Опыт Фуко тем замечателен, что он дает нам возможность определить вращение земли в закрытой комнате, не глядя на небо. Если бы небо было покрыто всегда густыми тучами, и мы никогда не видали бы ни звезд, ни луны, ни солнца, то опыт Фуко показал бы нам, что та земля, на которой мы живем, вращается. Всегда ли, однако, наш земной шар вращался в 24 часа вокруг своей оси? Теоретические исследования за последнее истекшее полустолетие показали, что это далеко не так, что наш земной шар имеет свою историю, и что эта история еще и сейчас не закончилась. Этот исторический процесс, раскрытый целым рядом крупнейших ученых, среди которых необходимо упомянуть фран-

цузского математика Пуанкаре и английского астронома Джорджа Дарвина, как нельзя лучше подтверждает мысль Энгельса, что в природе в конечном счете все происходит „диалектически, а не метафизически", что в природе нет застывших неподвижных форм, что решительно все находится в непрерывном процессе развития. Мы не имеем возможности проследить в деталях процесс развития нашей планеты с ее спутником-луной и ограничимся только кратким изложением результатов упорной работы величайших теоретиков механики за последнее полустолетие. Когда то, что теперь образует земной шар и луну, представляло собой раскаленный клубок газов, простиравшийся от центра земли гораздо дальше того места, где сейчас находится луна, то этот клубок газообразной материи, сжимаясь под влиянием силы тяжести, должен был ускоряться в своем вращении. Что сжатие вращающейся массы связано с ускорением самого вращения, можно показать на следующем опыте. Я становлюсь на скамейку, которая легко на шариках может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Я вытягиваю обе руки в разные стороны и прошу моего помощника, чтобы он меня слегка подтолкнул. Вы видите, что я очень медленно поворачиваюсь. Если я теперь начну „сжиматься", т. е. опущу вытянутые руки, сделаю то, что в старину называлось: „руки по швам", то я, как Вы видите, начинаю очень быстро вращаться. Этим пользуются балетные танцоры, они закручиваются с вытянутыми руками и потом быстро их опускают— этим достигается головокружительная скорость вращения. Во всяком случае, этот опыт наглядно показывает, что сжатие вращающегося тела ускоряет процесс вращения. По мере увеличения скорости вращения форма равновесия, о которой у нас была речь, когда мы обсуждали причины, почему сила тяжести не везде одинакова (рис. 49), становится все более и более сплюснутой, но, как показали теоретические исследования, такая сплюснутая форма—эллипсоид вращения— может существовать только до тех пор, пока ось вращения не достигнет 0,6 (точнее 0,583) доли экваториальной оси (см. рис. 55). При дальнейшем увеличении скорости вращения эта форма равновесия становится неустойчивой и „скачком", у нас появляется новая форма равновесия—так называемый трех-осный эллипсоид, т. е. тело, у которого в сечении, перпен-

дикулярном к оси вращения, будет не круг, как это было в эллипсоиде вращения, а эллипс (см. рис. 56). Этот эллипс

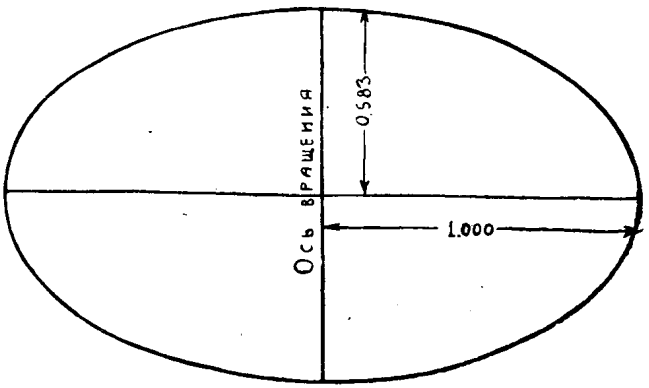


Рис. 55.

по мере увеличения скорости вращения все более и более вытягивается, но, наконец, при определенной скорости вращения и эта форма равновесия перестает быть устойчивой: наступает новый переход количества в качество— новый скачок, появляется форма равновесия, которую Джордж Дарвин назвал „грушевидным телом" (рис. 57). При дальнейшем увеличении скорости вращения вытянутая часть груши отделяется и, таким образом, по Дарвину образовалась луна. После этого, благодаря влиянию приливов сначала в расплавленной массе, а потом в появившихся после остывания земли морях и океанах, вращение земного шара замедляется, замедляется также и обращение луны вокруг земного шара. Почему сейчас, т. е. при теперешнем состоянии земного шара, вращение земли тормозится приливами, видно из следующей схемы (рис. 58). Луна L притягивает жидкую оболочку океана на обращенной к ней стороне земли P сильнее, чем ядро земли T, так как эта часть оболочки ближе к луне. Точно также на противоположной стороне Q жидкая оболочка океана будет притягиваться слабее, потому что она дальше отстоит от луны. Этим об'ясня-

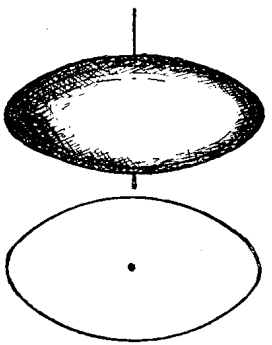


Рис. 56.

ются выпуклые части жидкой оболочки P и Q (на чертеже они нарисованы в сильно преувеличенном виде) [1]). Луна по своей орбите обходит землю приблизительно в 28 суток. Следовательно, с ней вместе поворачивается и фигура PQ, а земной шар поворачивается вокруг своей оси в 24 часа; поэтому, вращаясь в собственной жидкой оболочке, он тормозится. По Дарвину, около полумиллиарда лет тому назад, когда луна только что отделилась от земли, земной шар вращался вокруг своей оси в $3^1/_2$ наших часа. Доступное и вместе с тем строгое изложение этой замечательной теории можно найти в прекрасной книжке Д. Дарвина „Приливы и родственные им явления“ [2]). Там Дарвин об'ясняет, почему движение оторвавшейся от земли луны замедлилось с $3^1/_2$ часов до 28 суток, а также пытается проследить дальнейшую судьбу луны и земного шара. Для нас эта теория интересна тем, что в ней мы находим массу примеров перехода количества в качество, причем это новое качество появляется скачком на определенной ступени развития планеты и ее спутника. Весьма интересно, что Дарвин своим умом додумался до революционного значения этой открытой им замечательной картины диалектического развития в природе. Он уподобляет открытые им скачки—переходы от одной формы равновесия к другой — революциям в общественной жизни, за что он и подвергался на-

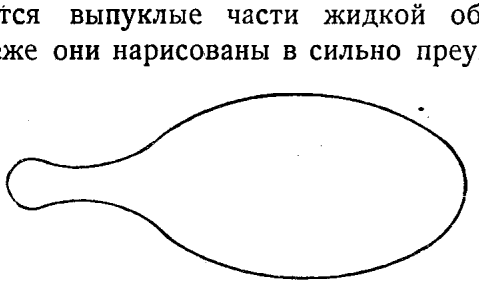


Рис. 57.

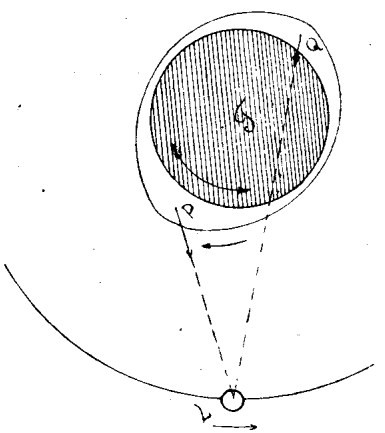


Рис. 58.

1) Вследствие запаздывания под'ема воды, благодаря трению, P, Q, T и L не лежат на одной прямой линии.

2) Госиздат, 1923 год.

смешкам в буржуазной печати, „как беспочвенный фантазер", устанавливающий аналогии там, где их на самом деле нет!

В заключение остановимся на том доказательстве теории тяготения Ньютона, которое он сам нашел и которое дало право назвать закон Ньютона—законом всемирного тяготения.

Ньютон поставил себе вопрос: какая сила заставляет луну двигаться по замкнутому пути вокруг земного шара [1])? Ответ его был следующий: та же самая сила, которая заставляет все тела падать на землю—т. е. сила тяжести или притяжение земли. Мы знаем, какую величину имеет притяжение земли на поверхности земного шара. Ускорение, вызванное этой силой, выражается числом 981. Вес одного грамма на поверхности земли измеряется 981 диной. Центр луны отстоит от центра земли в 60 раз дальше, чем шарообразная поверхность земли отстоит от ее центра. Другими словами—радиус лунной орбиты в 60 раз больше радиуса земного шара. Помня закон Ньютона, мы должны будем сказать, что сила притяжения земли там, где находится центр луны, будет в 3600 раз меньше, расстояние в 60 раз больше, а сила должна уменьшиться в $60 \times 60 = 3600$ раз. Разделив 981 на 3600, мы получаем ускорение силы тяжести, вызываемое земным притяжением на луне—$g^1 = \frac{980}{3600} = 0{,}27$ (В). Таким образом, всякое тело, помещенное от центра земли на таком же расстоянии, как луна, будет падать на землю так, что в каждую секунду скорость будет нарастать на 0,27 сантиметра в секунду, т. е. около 3 миллиметров в секунду. Падающее с таким ускорением тело в 10 секунд пройдет 13,5 сантиметра. Но действительно ли луна получает такое ускорение? Зная расстояние луны от центра земли и зная время, в течение которого луна обходит землю (приблизительно 27,5 суток), можно определить действительное ускорение в круговом [2]) движении луны. Этот расчет надо сделать по формуле (10) (см. V лекцию)

---

[1]) Строго говоря, и луна и земля вращаются вокруг общего центра массы земли и луны, но так как луна в 80 раз легче земли—ее масса в 80 раз меньше, то общий центр масс лежит в 80 раз ближе к центру земли, чем к центру луны. Дело происходит так: все расстояние между центром луны и центром земли надо разделить в отношении одного к 80, и подобно тому, как на рычаге большая сила должна быть приложена ближе к оси вращения рычага, так и здесь общий центр масс, соответствующий оси вращения рычага, должен быть ближе к большей массе.

[2]) Луна двигается по эллипсу, очень мало отличающемуся от круга.

$g=a^2_0\ r$ . . . . (10) [1], где a_0 есть угловая скорость, т. е. 2π, разделенное на время обращения луны, выраженное в секундах. Величина r есть радиус орбиты луны (лунного пути вокруг земли), т. е. 60R, где R—радиус земли=6370 килом. Подставляя вместо $R=6370\times60\times100000$ (т. е. выражая радиус лунного пути в сантиметрах) и заменяя a_0 через $=\frac{2\pi}{T}=$ $=\frac{2.\ 3{,}14}{27{,}5\times24\times60\times60}$ [2] $=\frac{2{,}65}{1000000}$ и возводя в квадрат a_0, т. е. умножая a_0 само на себя, мы по формуле (10) находим число $g^1=0{,}267$ [3] (0,27 приблизительно), совпадающее с тем, что должно быть по закону Ньютона (см. формулу (B).

В биографии Ньютона рассказывают, что когда он производил это вычисление, то он так волновался, что вынужден был бросить работу и передать ее своим друзьям. Согласие вычисленной цифры 0 27 с наблюденной сразу подвело прочную основу под учение Ньютона о всемирном тяготении, дальнейшие исследования в области движения планет и двойных звезд еще более убеждают нас в правильности предположения Ньютона.

---

[1]) Товарищи, затрудняющиеся вычислениями, могут этот расчет пропустить.

[2]) Время 27,5 суток, выраженное в секундах, будет: $27{,}5\times24\times60\times60$.

[3]) Полного совпадения не может получиться, так как все величины, входящие в состав формул, не могут быть измерены абсолютно точно. У нас получилось однако большее расхождение, чем в действительности, потому что мы взяли слегка округленные цифры, например, для продолжительности месяца 27,5 суток.

ЛЕКЦИЯ СЕДЬМАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Чем отличаются друг от друга жидкости, газы и твердые тела. Условия равновесия жидкостей. Гидравлический пресс. Давление на дно сосуда. Парадокс Паскаля. Как определяется давление и вес воздуха. Устройство воздушного насоса.

На прошлой лекции мы закончили изложение основ механики Ньютона, конечно, в тех рамках, какие нам навязаны небольшим числом часов, отведенных на занятия физикой, и нам остается теперь разобрать некоторые практически важные приложения этих основ. Мы сегодня займемся изучением механики жидкостей и газов. Многие из тех вопросов, которые мы будем разбирать сегодня, Вам уже отчасти известны из лекций по химии, кроме того на практических занятиях у нас поставлено довольно много задач, и в этой области—гораздо более легкой чем то, чем мы занимались с Вами до сих пор—Вам будет предложено самостоятельно разобраться по крайней мере в простейших вопросах с тем, чтобы Вы испытали свои силы. Поэтому сегодняшнюю лекцию можно рассматривать, как введение к тем самостоятельным занятиям в лаборатории по изучению жидкостей и газов, к которым Вы скоро приступите [1]).

Прежде всего, чем отличаются жидкости и газы от твердых тел? Отдельные частицы жидкостей или газов, в противоположность твердым телам, легко могут скользить друг вдоль друга: они легко могут перемещаться

---

[1]) См. Пособие к занятиям по физике. Издание Коммунистического Университета имени Я. М. Свердлова, 1924 г.

внутри всей массы жидкости или газа. Так, если на дно большого сосуда с водой положить кусок легко растворяющейся краски, то вода около этого кусочка сейчас же густо окрасится; но стоит только помешать воду стеклянной палочкой, как сейчас же краска распространится на весь сосуд. Точно также, если мы выпустим из трубки небольшое количество светильного газа, то через некоторое время мы почувствуем характерный запах газа в самых отдаленных частях комнаты. Распространение газа ускорится, если мы вызовем в воздухе струю, например, будем махать платком по направлению от незажженой горелки, откуда идет газ, к тому углу комнаты, где стоят наблюдатели. Вследствие этой легкой подвижности своих частиц жидкости и газы сразу принимают форму сосуда, в который их помещают. Мы эту особенность жидкостей и газов выражаем словами так: *жидкости и газы не сопротивляются изменению формы.* Это положение, однако, не в одинаковой степени приложимо ко всем жидкостям, так, например, густой сироп—густое варенье не сразу заполняет сосуд: при изменении формы мы встречаемся с некоторым сопротивлением—это сопротивление мы выражаем словом „вязкость". Все жидкости в большей или меньшей степени обладают вязкостью, так что различие между густым вареньем и легко-подвижным спиртом или эфиром—чисто количественное. Газы обладают ничтожной вязкостью по сравнению с жидкостями. Эта легкая подвижность жидкостей и газов представляет их главное отличие от твердых тел. Мы не можем, например, передвинуть частицы, находящиеся на одном конце линейки, на другой, как это мы делали в стакане с подкрашенной водой. Кроме того при изменении формы твердого тела надо затрачивать большие усилия; например, чтобы согнуть толстую железную полосу, надо очень большое усилие. Но и здесь точно также нельзя провести резкой грани между твердыми телами и жидкостями, обладающими большей вязкостью. Так, твердые куски канифоли или сургуча обладают до известной степени свойствами густого сиропа. Палочка сургуча, подпертая на своих концах, прогибается через несколько недель под собственным весом. Куски канифоли, положенные в сосуд с отверстием внизу, постепенно заполняют весь сосуд и образуют каплю, которая свешивается из отверстия. С другой

стороны, жидкости и твердые тела имеют между собой то общее, что они в сильной степени сопротивляются изменению об'ема. Если подвергать жидкость, заключенную в цилиндре под поршнем, сильному давлению, то жидкость сжимается на ничтожную величину, правда, несколько большую, чем твердые тела. Газы, как Вы уже знаете из химии, сжимаются легче, и притом во сколько раз сильнее давление, во столько раз получается меньший об'ем, при условии, что температура остается все время без изменения (закон Бойля Мариотта). Как следствие легкой подвижности частиц жидкостей и газов, вытекает одно из условий их равновесия, именно, если на поверхность жидкой или газообразной массы действуют силы то эти силы должны быть перпендикулярны к поверхности. По этой причине вода в любом сосуде имеет всегда горизонтальный уровень. Представим себе на минуту, что уровень не образует прямого угла с отвесной линией, по которой направлена сила тяжести P (см. рис. 59). Мы можем сейчас же силу P разложить на две слагающие: P_1 под прямым углом к поверхности—эта сила прижимает частицу ко всей остальной массе жидкости—и P_2, направленную вдоль уровня. Ясно, что, благодаря легкой подвижности, частицы будут скатываться к D до тех пор, пока уровень не станет горизонтальным (CC).

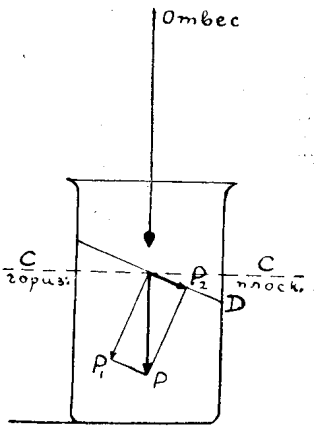


Рис. 59.

Познакомимся сейчас еще с одной особенностью жидкостей и газов. Возьмем стеклянный шар, на поверхности которого в разных частях имеются одинаковые отверстия; к шару присоединен небольшой насос с поршнем; наполняем шар и цилиндр насоса водой, выгоняя оттуда пузырьки воздуха. Вынимаем шар из воды, держим его так, что все отверстия шара лежат в одной горизонтальной плоскости, и постепенно начинаем давить на поршень. Вы видите, что вода вытекает совершенно одинаковыми струями во все стороны; если я давление увеличиваю, нажимая рукой на рукоятку поршня, то все струйки разом бьют дальше, если я

ослабляю движение, то опять-таки все струйки разом становятся слабее. Этот опыт показывает, что давление в жидкости передается равномерно во все стороны (закон Паскаля, род. 1623, ум. 1662.). Мы нарочно держали шар так, чтобы все отверстия лежали в горизонтальной плоскости, и чтобы сила тяжести действовала одинаковым образом на все струйки. Покажем теперь, что закон Паскаля можно вывести из принципа возможных перемещений Лагранжа. Представим себе, что мы наполнили водой резиновый мешок, слегка растянув его; упругие силы этого мешка будут сдавливать воду. Когда мешок и вода придут в состояние равновесия — положим, что мешок лежит на столе, и на рис. 60 мы как бы смотрим на него сверху—то все силы должны в каждой части поверхности образовать прямой угол с ней: иначе частицы жидкости будут скользить вдоль поверхности и равновесия не будет. Положим теперь, что мы вырезали часть резинового мешка AB, вставили в отверстие цилиндр и вставили поршень S_1. Для того, чтобы сохранить равновесие, необходимо к поршню приложить силу P_1, которая могла бы заменить вполне действие вырезанной части резиновой оболочки. Силу $p_1 = \frac{P_1}{S_1}$.. (16), приходящуюся на каждый квадратный сантиметр поверхности, мы будем называть „давлением“ на поршень S_1. Сделаем теперь то же самое в другой части CD нашей оболочки, но пусть эта часть CD лежит в одной и той же горизонтальной плоскости. Обозначим силу, приложенную к поршню S_2, через P_2 и давление через $p_2 = \frac{P_2}{S_2}$. Ясно, что равновесие не нарушится, если мы цилиндры AB и CD

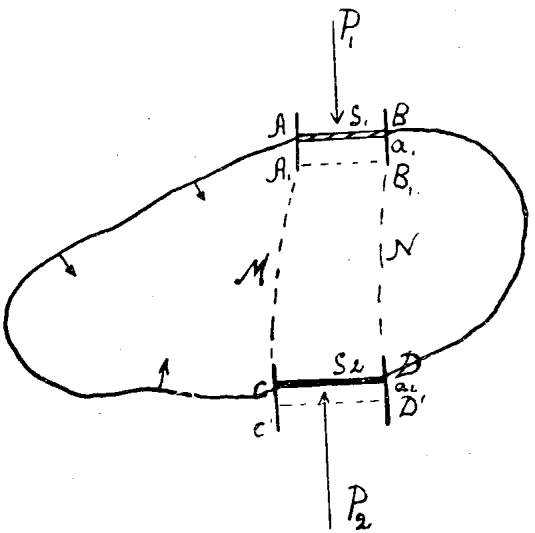


Рис. 60.

соединим трубкой с твердыми стенками MN. Как узнать, при каких условиях часть жидкости, заключенная в трубку, будет в равновесии? Применим принцип Лагранжа. Возможные перемещения будут у нас несомненно двухсторонними: можно двинуть поршень S_1, тогда S_2 сместится внаружу, или, наоборот, вдвинуть S_2 (см. лекцию III), тогда S_1 пойдет внаружу. Пусть поршень AB мы сместили на a_1 сантиметров, из под него должен вытесниться об'ем S_1a_1—об'ем тем больше, чем больше площадь поршня, и чем дальше мы его сдвинули. Но так как жидкость можно считать несжимаемой, то поршень S_2 должен выдвинуться на столько a_2 сантиметров, чтобы об'ем, находящийся под поршнем, увеличился на ту же величину—сколько в первом цилиндре убавилось, столько же во втором должно прибавиться, так что $S_1a_1=S_2a_2$ (17). Подсчитаем теперь работу, произведенную при возможном перемещении. Сила, действующая на первый поршень $P_1=p_1 S_1$ (давлению, умноженному на площадь (см. 16), перемещение a_1 по нашему предположению направлено в сторону действия P_1. Итак, работа будет $P_1a_1=p_1S_1 a_1$; работа же силы, действующей на второй поршень, будет—$-P_2a_2=-p_2S_2a_2$, знак—потому что перемещение направлено против направления действия силы. Правило Лагранжа (см. III лекцию) требует, чтобы $p_1S_1a_1-p_2S_2a_2=0$. . . . (18) откуда, разделив равенство (18) на (17), находим $p_1-p_2=0$ или $p_1=p_2$, т. е. давление со всех сторон одинаковое. Не забудем, что поршни заменяли нам части резиновой оболочки и, по предположению, сила, действующая на поршень, была подобрана такая же, какая в действительности имела место в данной части оболочки, которую мы заменили поршнем. Кроме того, мы могли выбрать область AB и CD, где угодно, лишь бы соединяющая эти части трубка MN была горизонтальна, чтобы можно было не считаться с действием силы тяжести. Итак, закон Паскаля, устанавливающий равномерную передачу давления в жидкости во все стороны, является следствием принципа Лагранжа. Это показывает, насколько широкое применение имеет этот принцип, установленный французским математиком. Опыт показывает, что закон Паскаля применим и к газам. К шару, соединенному с небольшим насосом, в разных частях припаяны коленчатые трубки a, b (см. рис. 61); при движении поршня взад и вперед происходят одновременные

и одинаковые перемещения уровней в коленчатых трубках, таким образом, и в газе давление передается равномерно во все стороны. Принцип Паскаля позволяет нам об'яснить действие гидравлического пресса. Положим, что мы опустили поршень в один квадратный сантиметр на глубину 10 сантиметров (см. рис. 62), т. е. вытеснили 10 кубических сантиметров, тогда поршень в 100 квадратных сантиметров должен подняться на 0,1 сантиметра или на один миллиметр, так как выступивший при этом об'ем, поднимающий большой поршень, будет равен тем же 10 куб. сант. ($0{,}1 \times 100 = 10$).

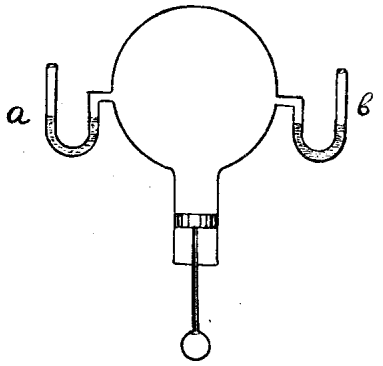


Рис. 61.

Какое давление должно производиться на поршни при состоянии равновесия? Так как по закону Паскаля давление на каждый квадратный сантиметр должно быть одинаково, то отношение давлений будет как 1 к 100 по числу квадратных сантиметров сечения поршней A и B. Таким образом, можно, как на рычаге, малой силой уравновешивать большую, а при небольшом избытке со стороны малой силы можно даже преодолевать сопротивление большой и поднять ее точку приложения. Из приведенного расчета ясно, что т. н. „золотое правило" механики выполняется и здесь: один килограмм опускается на 10 сантиметров, *производит*, следовательно, работу в $1 \times 0{,}1 = 0{,}1$ килограмм-метра. *Над грузом в 100 килограмм производится* работа $100 \times 0{,}001 = 0{,}1$ килограмм-метра. Если мы устроим клапаны (1) и (2), как показано

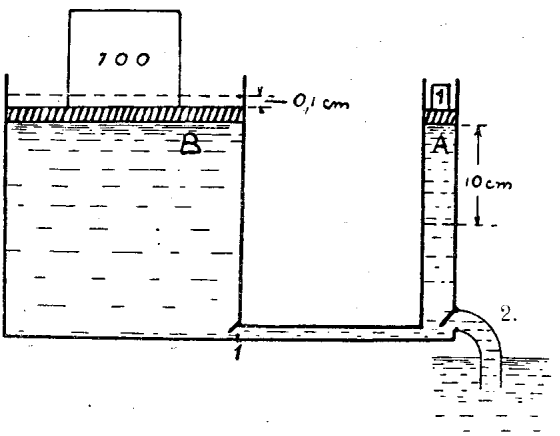


Рис. 62.

на чертеже, то мы сможем, непрерывно подкачивая под поршень В воду, поднимать груз вверх, а поместив над поршнем прочную перегородку, сдавливать находящийся на поршне груз. Гидравлическим прессом пользуются, когда требуется подвергать обрабатываемый предмет действию большого давления, например, превращать порошки в плотные твердые пластинки. Целый ряд лекарств изготовляется таким образом в виде маленьких пластинок, которые удобно глотать. Угольный порошок спрессовывают в твердые нерассыпающиеся „брикеты", т. е. куски, имеющие форму кирпичей. Наконец, пачки железных листов с бумажными прокладками, идущие на изготовление динамо-машины и электрических двигателей, спрессовываются таким же образом.

Посмотрим теперь, к чему сведутся условия равновесия жидкости, если мы выясним еще, какое влияние оказывает сила тяжести. Мы до сих пор рассматривали такие случаи, при которых действие силы тяжести заметно не сказывалось. Положим, что вода сплошь заполняет цилиндр ABCD (рис. 63) под поршнем AB. Если мы будем увеличивать давление на поршень, то, по закону Паскаля, это давление будет равномерно передаваться во все стороны. Если бы даже поршня не было, то все равно на поверхность воды производилось бы давление, вызываемое весом находящегося над водой воздуха. Что же производит сила тяжести? Она производит увеличение давления по мере того, как мы приближаемся к дну сосуда, благодаря весу воды, находящейся над данным уровнем. Таким образом, давление на уровне aa будет слагаться из переданного без изменения давления, производимого на поверхность, и к этому добавляется давление, вызванное весом воды, находящейся в верхней части aa AB сосуда ABCD. Если мы обозначим давление, производимое поршнем и стоящими на нем грузами, совместно с давлением атмосферы через p_1, то давление p_2, производимое на каждый квадратный сантиметр слоя aa, будет увеличено на величину веса столба воды h (см. рис. 63),

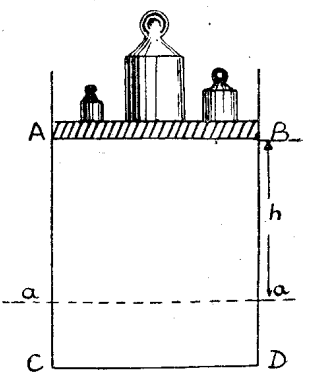


Рис. 63.

т. е. на величину dgh, где d—„плотность", т. е. число граммов в одном кубическом сантиметре, а g ускорение силы тяжести [1]). Итак $p_2 = p_1 + dgh$.... (19). — Это — основной закон, определяющий давление на разных глубинах жидкости, находящейся в равновесии. Для того, чтобы показать увеличение давления по мере возрастания глубины, воспользуемся следующим прибором. Металлическое кольцо A (рис. 64), обтянутое с обеих сторон тонким резиновым полотном на подобие барабана, при помощи длинной трубки сообщается с коленчатой трубкой (манометр), заполненной жидкостью. Барабан можно опускать на различную глубину, причем его можно помещать под водой в различных положениях, поворачивая его вокруг оси OO_1, параллельной натянутым резиновым пластинам. Чем больше давление, т. е. чем глубже мы опускаем барабан в воду, тем сильнее сжимается находящийся в барабане воздух, и тем больше становится разность уровней в измерительной манометрической трубке bc. Это увеличение давления, зависящее от веса выше лежащих слоев воды, может достигнуть громадной величины на большой глубине; так, на дне океанов, имеющих глубину до 8 километров— в Тихом океане вблизи берегов Японии давление имеет громадную величину—до 800 килограмм на квадратный сантиметр! Живущие на этих больших глубинах рыбы, проводящие там всю жизнь, погибают, когда их извлекают на поверхность океана: находившиеся под таким громадным да-

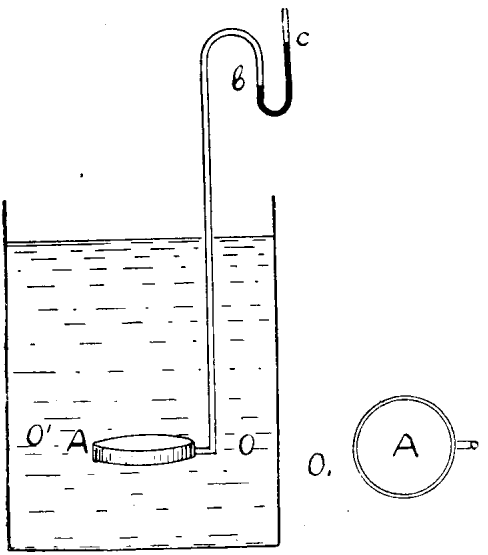


Рис. 64.

[1]) Об'ем столба высоты h с основанием в один квадратный сантиметр равен h кубическим сантиметрам. Так как плотность d есть число граммов в одном кубическом сантиметре, то hd—общее число граммов в столбе h (для воды d=1). Чтобы выразить силу в динах, надо умножить число граммов на величину ускорения (см. IV лекцию).

влением газы воздуха, заключенные внутри организма рыбы и частью растворившиеся в воде, входящей в состав организма, при сильно понизившемся внешнем давлении выделяются и расширяются, сильно раздувая рыбу; дело кончается тем, что рыба лопается и погибает. По этой причине и человеку со всеми водолазными принадлежностями нельзя опускаться на очень большую глубину, так как наш организм не выдерживает очень больших изменений давления, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Водолазные работы производятся вообще не в очень глубокой воде.

Покажем сейчас, что и для жидких тел имеет место закон равенства действия и противодействия. Опустим в большой сосуд с водой цилиндрическую трубку, дно которой закрыто пришлифованной к ней стеклянной пластинкой А (см. рис. 65). Мы эту пластинку слегка прижимаем к краям цилиндра, натягивая нитку, пропущенную через цилиндр. Как только мы погрузили в воду закрытый конец цилиндра, мы сейчас же замечаем, что пластинка плотно прижимается к краям цилиндра и ее нет нужды удерживать за веревку; мы отпускаем веревку, а пластинка не падает. Почему она не падает? Потому что если нижние слои находятся под давлением верхних, то и нижние давят на верхние с той же силой. Это можно доказать на опыте: наливаем в наш цилиндр воду, и, когда уровень воды в цилиндре сравняется с уровнем в наружном сосуде, пластинка отваливается. Давления с обеих сторон на пластинку стали одинаковыми, а это показывает, что давление, прижимавшее пластинку к цилиндру, равняется как раз весу столба воды, расположенного под ней.

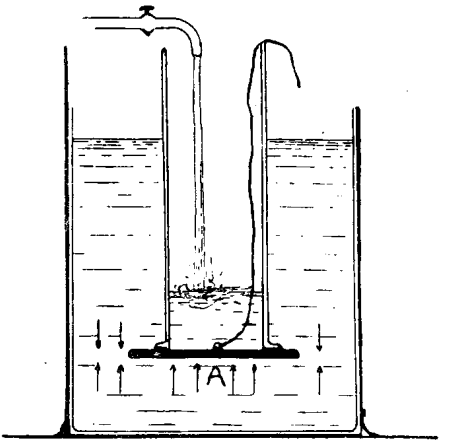


Рис. 65.

Предположим теперь, что мы в плоскую ванночку (рис. 66) АВСД, в которую налита вода, находящаяся в равновесии,

и наполняющая сосуд до уровня AB, вставили твердые перегородки abcd,efg,hik. Равновесие от этого не изменится; пусть перегородка плотно прилегает к стенкам плоской ванночки, тогда мы можем, не нарушая равновесия, убрать воду из частей a b c d, e f g и h i k, совершенно отделенных и не связанных с областью m n p q r. От этого равновесие также не изменится. Отсюда мы получаем следующий весьма важный результат: в сообщающихся сосудах m, n, p и q, сообщающихся при помощи трубки r, вода или какая угодно другая жидкость стоит на одной и той же высоте. Это так называемый закон сообщающихся сосудов. Он вытекает из общего закона изменения давления с глубиной, который мы вывели (см. ур-ие (19). Действительно, равновесие будет иметь место только тогда, когда давление в отверстиях (1), (2), (3) и (4) нижней трубки, соединяющей трубки m, n, p, q, будет одинаково: иначе вода будет переливаться из одного сосуда—оттуда, где давление выше, туда, где оно ниже, а по (19) ясно, что так как атмосфера давит одинаково на уровни во всех трубках, то отверстия (1), (2), (3) и (4) должны лежать на одной и той же глубине h: иначе при равных значениях p мы не получим одинаковых значений p_2. Однако, не всегда следствия из основного закона равновесия представляются нам столь очевидными, как только что разобранный пример. Иногда эти следствия кажутся нам противоречащими всему нашему повседневному опыту и совершенно непонятными. К числу таких следствий относится т. н. „парадокс“ [1]) Паскаля. Представим себе цилиндрический сосуд с основанием в 1000 квадратных сантиметров и высотой в 1 сантиметр в

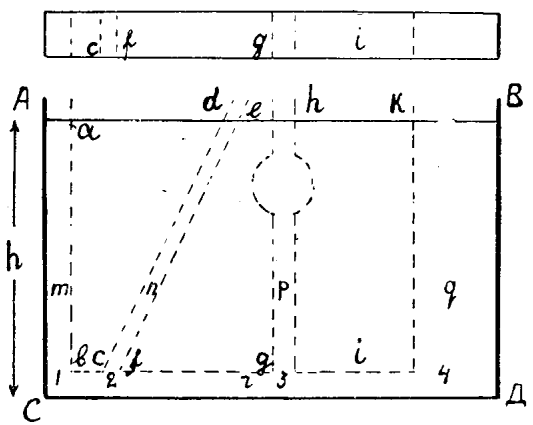


Рис. 66.

[1]) Парадокс значит: случающийся вопреки ожиданию, противоречащий здравому смыслу.

виде блина, изображенный в разрезе ABCD на рис. 67. Пусть посредине верхнего основания AB вставлена трубка EE^1 с сечением в один квадратный сантиметр и высотой в 100 сантиметров. Подсчитаем, как велико давление на дно CD, вызванное налитой в сосуд водой, доходящей до верхнего конца трубки EE^1. Давление на каждый квадратный сантиметр дна выразится весом столба воды в 101 сантиметр, т. е. будет равно 101 грамму, а так как площадь сечения дна сосуда равна 1000 квадратных сантиметров, то равнодействующая, приложенная к дну сосуда, будет 101 грамм×1000, т. е. 101 килограмм—около 6 пудов! Посмотрим теперь, сколько

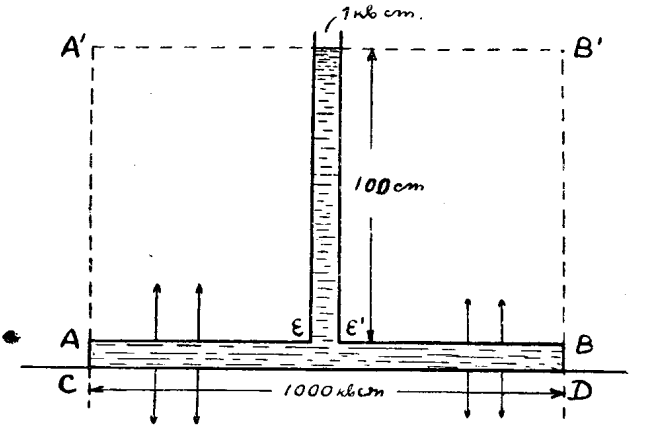


Рис. 67.

весит вода, налитая в сосуд. В цилиндрическом сосуде ABCD умещается всего 1000 кубических сантиметров—следовательно, вес ее будет один килограмм, вес воды в трубке EE^1 составляет всего 0,1 килограмм, т. е. около четверти фунта. Итак, всего в сосуде находится $2^3/_4$ фунта воды и эти два и три четверти фунта оказывают на дно давление в 6 пудов! Как будто бы это дно составляло дно сосуда CAA^1B^1BD, где действительно умещается 101 литр воды. Как же разрешается это противоречие? Если мы поставим весь наш сосуд на весы, то весы покажут вес самого сосуда, т. е. около $2^3/_4$ фунта воды. Если же мы укрепим стенки $CAEE^1BD$ сосуда на твердой подставке, а дно CD, которое пусть у нас пришлифовано к краям CABD на проволоке (проволока в данном примере должна выдерживать вес 6 пудов), проходящей сквозь трубку, подвесим к коромыслу весов, то на другую

чашку придется положить разновеса около 6 пудов! В нашем расчете мы подсчитывали давление на дно и не считали давления на верхнее основание цилиндра CABD; ведь давление по закону Паскаля передается во все стороны равномерно! Поэтому верхнее основание цилиндра AEE¹B принимает на себя давление, направленное вверх и равное весу 1000×100 грамм или 100 килограмм (если не считать трубки EE¹, занимающей один квадратный сантиметр)—100 килограмм, а не 101, потому что CD на 1 сантиметр глубже AB! Разница в высотах 101—100 и дает нам вес воды в сосуде ABCD. Таким образом, если мы возьмем равнодействующую

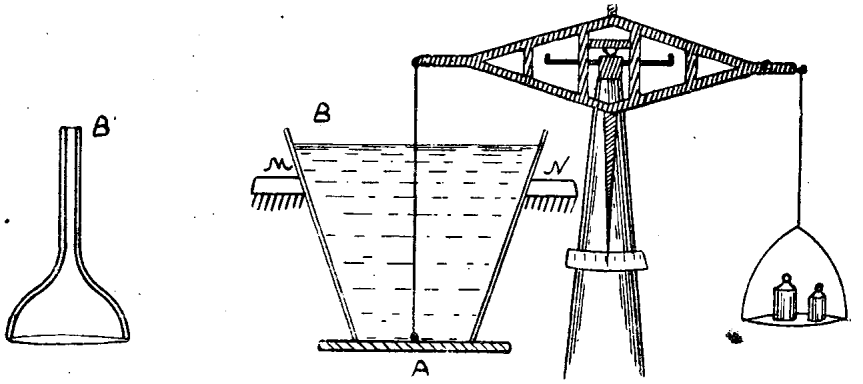


Рис. 68.

сил давления, приложенных на все стенки сосуда, мы получим вес воды в сосуде. Если возьмем только часть стенок, то сила давления может быть значительно больше, потому что при общем итоге ее могут уравновесить силы, приложенные к другим частям стенок сосуда, направленные в противоположную сторону. Правильность вывода Паскаля мы проверяем на опыте с пластинкой A, которая пришлифована к сосудам различной формы B, B¹ (см. рис. 68), и которая подвешена к коромыслу весов. Пластинка отрывается всегда при одной и той же высоте уровня воды в сосудах, какова бы ни была их емкость. Боковые же стенки не действуют на весы, так как они укреплены на подставке MN, не связанной с коромыслом весов. Вопросы, затронутые нами здесь, имеют большое практическое значение. Котел водяного отопления соединяется с системой труб, доходящих до верхних этажей дома. Хотя в общей сложности в трубах не так много воды, но

вследствие высоты уровня (тем выше, чем выше дом!) давление на дно и боковые стенки котла, находящегося обыкновенно в подвальном этаже, достигает весьма значительных размеров. Поэтому при расчете котла надо весьма внимательно высчитывать давление воды, которое получится, когда все трубы водяного отопления будут наполнены.

Этих сведений из области механики жидкости, я думаю, Вам будет достаточно, чтобы приступить к лабораторным занятиям. Обращаю особенно Ваше внимание на то, что установленные нами раньше общие законы механики оправдываются как нельзя лучше в этой области.

Переходим теперь к изучению атмосферного давления. Прежде всего покажем, что воздух имеет вес. На весах (рис. 69) у нас подвешен стеклянный шар А, с двумя стеклянными кранами m и n. Шар наполнен воздухом и уравновешен так, что стрелка весов показывает нуль делений. Выкачиваем теперь воздух с помощью насоса, о котором речь у нас будет впереди. Насос приводится в движение электрическим двигателем. Вы слышите, что, по мере того, как воздух выкачивается, насос бежит все быстрее и быстрее. Пока воздуха много, насос производит работу—вращение замедлено; когда воздуха осталось уже мало, работа насоса уменьшается, и двигатель вертится быстрее. Закрываем второй кран (первый кран мы закрыли, когда начали выкачивать) и подвешиваем шар вновь к весам. Шар стал теперь легче. Чтобы восстановить равновесие, надо на чашку, к которой подвешен шар, положить около 4,5 грамм. Емкость шара немного больше 4 литров (4000 куб. сант.)—можно определить, наполнив шар водою и измерив об'ем этой воды. Таким образом, 1000 кубических сантиметров воздуха весят около 1 грамма (при 0° и

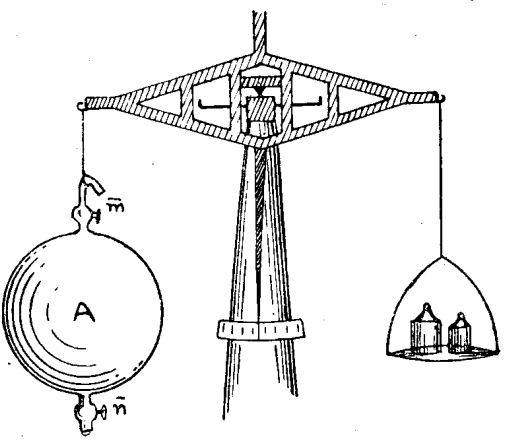


Рис. 69.

давлении в 760 м/м., см. дальше—1 литр весит 1.293 грамма). Это значит, что воздух в 1000 раз легче воды (1 литр воды весит 1000 грамм или 1 килограмм). Теперь осторожно открываем кран так, чтобы воздух медленно со свистом входил в шар, и Вы видите, как постепенно чашка весов с шаром начинает перетягивать, и в то же время Вы слышите свист входящего воздуха. Подсчитаем теперь, сколько весит воздух в небольшой комнате в 5 аршин высотой и площадью в 20 квадратных аршин—это будет приблизительно 30 кубических метров или 30.000 литров. Так как литр воздуха весит около грамма, то 30.000 литров будут весить 30 килограмм или около 2 пудов.

Можно ли после этого говорить—легкий, как воздух?

Весом воздуха и об'ясняется то давление, которое производит атмосфера, окружающая земной шар. Это давление было впервые измерено учеником Галилея—Торичелли. Классический опыт Торичелли мы сейчас повторим. Запаянная с одного конца стеклянная трубка, длиной около 90 сантиметров, тщательно наполняется ртутью, причем необходимо удалить малейшие пузырьки воздуха; это достигается постепенным наполнением трубки, осторожным нагреванием и встряхиванием. Открытый конец до верху наполненной ртутью трубки A (рис. 70) плотно закрывается пальцем и опрокидывается в сосуд с ртутью D, настолько глубокий, чтобы в ртуть можно было погрузить палец, закрывающий трубку. Выдернув палец, укрепляем трубку A в стативе C. Ртуть в трубке опускается до уровня приблизительно в 76 сантиметров [1]), считая от уровня ртути в сосуде D. Почему ртуть не выливается из запаянной трубки? Ртуть в трубке удерживается давлением воздуха на свобод-

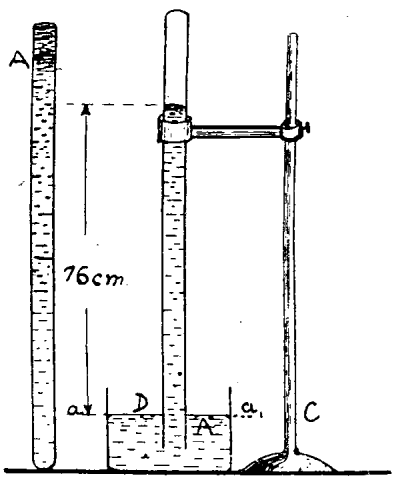


Рис. 70.

[1]) В зависимости от состояния погоды этот уровень колеблется в пределах от 79,0 до 73,5 сант.

ную поверхность ртути в широком сосуде D. В самом деле, при каких условиях ртуть в сосуде D на уровне aa_1 будет в равновесии? Давление на каждый квадратный сантиметр плоскости aa_1 должно быть одинаково, т. е. со стороны воздуха на каждый квадратный сантиметр давление должно быть таким же, как и со стороны ртути, стоящей в трубке A. Подсчитаем величину давления ртути, рассчитанную на квадратный сантиметр плоскости aa_1. Пусть высота столба ртути будет 76 сантиметров. Если бы у нас вместо ртути была вода, то вес столба в 76 сантиметров высотою и в один квадратный сантиметр сечения был бы 76 грамм, но так как ртуть в 13,6 раз тяжелее воды, то вес столба будет $76 \times 13{,}6 = 1033{,}6$ грамма или около 1 килограмма на квадратный сантиметр. Как раз этой величине и должно равняться атмосферное давление; давление атмосферы меняется в зависимости от состояния погоды, сообразно с этим изменяется и положение уровня ртути в трубке. Таким образом трубка Торичелли служит измерителем давления атмосферы или „барометром".

При расчете давления ртутного столба мы предполагаем, что то, что находится над ртутью в трубке, не оказывает давления; это предположение вполне правильно, потому что над ртутью нет воздуха: воздух туда попасть не может; когда мы переворачивали трубку, то при опускании ртути ни один пузырек воздуха не проскочил. В старину говорили, что над ртутью образуется „Торичеллиева пустота". На самом деле там остаются все-таки следы воздуха, который плотно прилипал к стеклу трубки, но это ничтожные следы, находящиеся в сильно разреженном состоянии, а как Вам уже известно из химии, чем меньше плотность газа, тем меньше оказываемое им давление (закон Бойля-Мариотта). Что там находятся лишь ничтожные следы воздуха, можно показать на следующем опыте: я быстро нагибаю трубку так, что ртуть быстро заполняет всю трубку в момент, когда ртуть касается запаянного конца. Вы слышите стук, напоминающий удар молотка; если в трубке с ртутью есть воздух, при обычном атмосферном давлении, то такого стука не получается: воздух играет роль прокладки между ртутью и стеклом. Опыт надо производить осторожно, при сильном ударе легко можно разбить трубку.

Нельзя ли пойти еще дальше в истолковании опыта Торичелли? Мы ведь рассчитали давление атмосферы, зная высоту столба ртути и зная, во сколько раз ртуть тяжелее воды, далее мы знаем, что воздух в тысячу раз легче воды, отсюда ясно, что можно рассчитать высоту столба воздуха, который производил бы одинаковое с ртутным столбом давление. В самом деле, давление атмосферы измеряется 1033,6 грамм. Как велик должен быть столб воздуха с сечением в 1 квадратный сантиметр, если куб. сантиметр воздуха весит (приблизительно) 0,001 гр.? Высота столба определится из уравнения:

$$x.\ 0{,}001 = 1033{,}6 \quad \text{или} \quad x = \frac{1033{,}6}{0{,}001} = 1033600 \text{ сантиметров} = 10336$$

метров=10,336 километров.

Итак, высота атмосферы должна быть около 10 верст. Однако, целый ряд фактов убеждает нас, что и выше этого уровня есть воздух, хотя и очень разреженный. Так, например, так называемые „падающие звезды"—обломки небесных тел, попадающие в сферу притяжения земли и падающие на нее, начинают накаливаться и испускать свет на гораздо бо́льшей высоте: они светятся благодаря тому, что они сильно нагреваются при трении о воздух, а если мы видим результат трения в виде свечения, то, несомненно, значит есть воздух, о который происходит это трение. Наш расчет, следовательно, неверен, и мы сейчас сообразим—почему. Мы ведь в основу расчета положили, что плотность воздуха на протяжении всего столба одинакова, а ведь чем выше мы поднимаемся, тем меньше воздуха остается над нами, тем меньше он давит, поэтому слои воздуха, находящегося над землей, постепенно по мере удаления от уровня земли становятся менее плотными, так как они находятся под все меньшим и меньшим давлением, вследствие чего воздух расширяется и становится менее плотным; от этого кубический сантиметр воздуха, весящий 0,001 грамм на поверхности земли, будет весить меньше на высоте полуверсты над уровнем земли, еще меньше на высоте одной версты и т. д. Мы привели этот пример, чтобы показать, насколько осторожно надо производить всякие расчеты, как при этом внимательно надо учитывать все стороны данного явления, как нельзя ничего забывать, обращая внимание на ту сто-

рону, какая нас интересует в данный момент, т. е. надо всегда помнить основное правило диалектического метода: все наблюдаемые нами явления находятся во взаимной связи.

Остановим в заключение наше внимание на том, как устроен насос, которым мы сегодня пользовались. Внутри цилиндрического полого латунного цилиндра А вращается сплошной цилиндр В, касающийся стенки полого сосуда в С. В плоском отверстии цилиндра В (см. рис. 71) вставлены две пластины Д, которые пружиной Е прижимаются к внутренней поверхности цилиндрической полости А. Цилиндр В приводится в быстрое вращение. Вследствие нецентрального положения В в полости А при вращении область *а* расширяется и из отверстия I воздух засасывается, область же *в* уменьшается, воздух в ней сжимается, приподнимает пружинку клапана М и выходит внаружу. Таким образом, при быстром вращении насос образует струю; воздух засасывается в I трубку и выбрасывается через трубку II. Сосуд, откуда воздух надо выкачивать, присоединяется к трубке I. Для более успешной работы полость А сильно смазывается маслом—это достигается автоматическим путем. Слой масла между пластинками Д и полостью А не пропускает воздуха в щель около С и в местах, где касаются пластинки Д. Кроме того, барабан В должен быстро вращаться, иначе воздух все равно прососется через слои масла. Насосы такого типа, разработанные профессором Геде в Германии, в настоящее время широко применяются в целом ряде производств. Они служат для предварительного выкачивания, — выкачивания „на черно" воздуха из электрических ламп, после чего из них выкачивают остатки воздуха ртутными насосами, дающими более сильное разрежение.

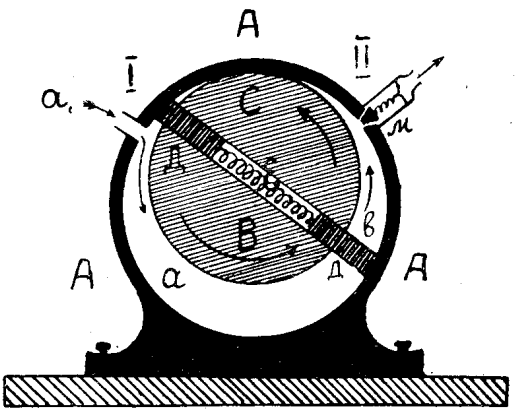


Рис. 71.

Еще раз подчеркиваем: все, о чем у нас шла речь сегодня, должно служить только введением к ряду самостоятельных упражнений, которые вы будете проделывать в лаборатории. Учение о жидкостях и газах является такой областью физики, которую легко изучить в лаборатории, т. е. легко лабораторию при сравнительно небольших затратах оборудовать так, чтобы в ней можно было каждому учащемуся самому изучать интересующие его явления, поэтому на долю лектора здесь выпадает только небольшое введение — сообщение нескольких руководящих мыслей и установление связи этой области с другими главами физики.

ЛЕКЦИЯ ВОСЬМАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Отступления от законов равновесия жидкостей. Молекулярные силы сцепления. Поверхностное натяжение. Факты, доказывающие существование поверхностной пленки. Явление смачивания. Об'яснение отступлений от закона равновесия.

Как одно из следствий основного закона равновесия жидкостей мы получили правило сообщающихся сосудов: мы видели, что в сообщающихся сосудах, какова бы ни была их форма—уровни лежат всегда в одной и той же горизонтальной плоскости. Вот здесь на столе у нас стоят сообщающиеся между собою стеклянные трубки с очень небольшими просветами. Один ряд трубок (рис. 72) наполнен подкрашенной водой, другой—(рис. 73) ртутью. Мы видим, что в этих трубках самым несомненным образом нарушается правило сообщающихся сосудов: чем трубки уже, тем выше в них уровень воды и тем ниже уровень ртути. Для всякого метафизически мыслящего человека тут есть от чего придти в отчаяние; только что мы себе выяснили, что основные законы механики приводят нас к выводу, что уровни всегда стоят на одной и той же высоте, независимо от формы сосуда, и вдруг для узких трубок это неверно! Но противоречие не должно пугать марксиста, знающего, что все вообще на свете идет путем развития противоречий и их разрешения. Этим основным положением диалектики постоянно, хотя иногда, быть может, и бессознательно, руководятся все выдающиеся исследователи, так, например, знаменитый физиолог Клод Бернар (род. 1813 г.—ум. 1873 г.) всегда

повторял своим ученикам: „не бойтесь противоречивых фактов, каждое противоречие есть залог нового открытия". Но, быть может, самый факт, наблюдаемый нами сейчас, и не заслуживает особого внимания? Однако, на целом ряде примеров, наудачу выбранных, вы сами убедитесь, что над этим явлением стоит подумать.

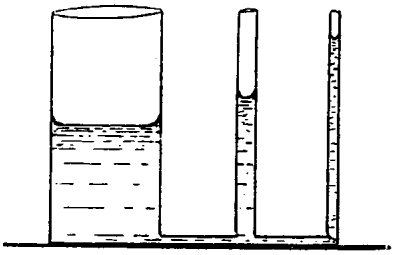


Рис. 72.

Если мы погружаем фитиль в керосин, то мы сейчас же замечаем, что фитиль пропитывается керосином не только в той части, которая погружена, но керосин поднимается выше, „ползет" вверх по фитилю. Об'ясняется это тем, что в ткани, из которой сделан фитиль, имеются узкие просветы, в которых такие жидкости, как спирт, керосин, масло и вода, поднимаются так же, как в узких трубках. Таким образом, вся техника освещения с помощью разнообразных ламп, начиная от масляных и кончая спирто и керосино-калильными, а также действие фитиля свечей основывается на законах наблюдаемого нами сейчас явления. Более того, под'ем воды в почве из более глубоких слоев на поверхность зависит от степени ее разрыхления: в рыхлой почве просветы шире, почему вода не так высоко поднимается и остается в глубине, откуда она не так легко испаряется, как с поверхности земли на ветру. На этом основано предохраняющее от засухи действие глубокой вспашки. Этих примеров, я думаю, достаточно, чтобы показать практическую необходимость—серьезно исследовать наблюденное нами сейчас явление. Это явление поднятия или опускания жидкостей в узких трубках носит название „капиллярности [1])" или „волосности" —от капиллярных или волосных трубок, т. е. от трубок с ши-

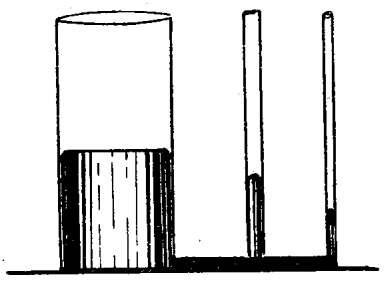


Рис. 73.

[1]) Капиллум по латыни значит волос.

риной просвета, приближающейся к толщине волоса. Присмотримся поближе к капиллярным трубкам с водой и со ртутью. Мы видим сразу же большое отличие между водой и ртутью. Поверхность воды в узкой трубке—вогнутая, имеет вид чашки. Наоборот, у ртути она выпуклая, в виде купола или колпачка. Эти поверхности в физике называются „менисками“ [1]). Поэтому говорят, что в капиллярных трубках у воды бывает вогнутый „мениск“, а у ртути — выпуклый. Форма мениска определяет собой—будет ли жидкость стоять в узкой трубке выше или ниже, чем в широкой.

Что форма мениска играет здесь определяющую роль, можно показать с помощью следующего опыта. Берем трубку длинную и широкую, которая сообщается с узкой и короткой (рис. 74). Если мы нальем в эти сообщающиеся сосуды небольшое количество воды, так чтобы уровень воды не доходил до конца узкой трубки, то получается обычная картина: в узкой трубке—вогнутый мениск, и уровень воды в узкой трубке стоит выше. Будем теперь осторожно приливать в широкий сосуд воду до тех пор, пока вода не начнет выступать из открытого конца *a* узкой трубки B, этим мы искусственно заставляем поверхность воды в узкой трубке сделаться выпуклой; при этом оказывается, что уровень в широком сосуде устанавливается выше, чем в узкой трубке, как это имеет место для ртути! Таким образом, непосредственный опыт убеждает нас, что форма мениска определяет ход явления.

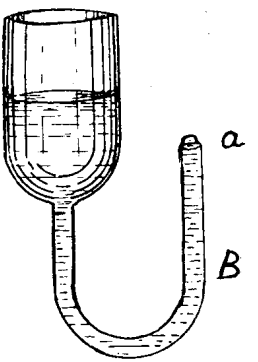


Рис. 74.

Если мы нальем воды на стекло, то вода растекается по стеклу или, как говорят, вода *смачивает* стекло, тогда как ртуть стекла не смачивает: она,—если взять ее в небольшом количестве,—собирается в капельки, не растекаясь по стеклу. Ясно, что смачивание происходит в тех случаях, когда притяжение частиц жидкости частицами твердого тела сильнее сцепления частиц жидкости между собой. Ясно, что вогнутый мениск получается в тех случаях, когда жидкость сма-

[1]) Мениск значит имеющий вид луны, когда мы ее видим как серп.

чивает вещество трубки, выпуклый же наблюдается в тех случаях, когда жидкость не смачивает. Мы приходим к выводу, что явления в капиллярных трубках зависят от сил сцепления, как между частицами жидкости между собой, так и между частицами жидкости и твердых тел. Прежде всего познакомимся поближе с этими силами сцепления или т. н. „молекулярными силами", т. е. силами, с которыми притягиваются друг к другу отдельные частицы или „молекулы" различных веществ.

Возьмем два свинцовых цилиндра A и B (рис. 75) и тщательно вычистим поверхности aa^1 и bb^1, ножом удаляя окись свинца, теперь постараемся надвинуть поверхность aa^1 на bb^1, сильно надавливая их друг на друга; мы видим, что цилиндры настолько слиплись друг с другом, что к нижнему A можно подвесить гирю, и он не отрывается. Успех опыта зависит от того, насколько хорошо вычищены поверхности, и не попала ли между поверхностями соринка. Все это показывает, что молекулярные силы достигают очень больших величин, но проявляются они на очень малых расстояниях; на расстояниях, равных „толщине волоса", эти силы уже незаметны; в этом отношении молекулярные силы значительно отличаются от сил всемирного тяготения. Расстояние, на котором еще заметно действие молекулярных сил, называется *„радиусом заметного действия"*. Посмотрим теперь, как можно доказать существование молекулярных сил сцепления между частицами жидкости и частицами твердого тела. На весах (рис. 76) подвешена в горизонтальном положении круглая стеклянная пластинка; пластинка уравновешена разновесом; приближаем к ней с помощью под'емного столика плоский сосуд с чистой ртутью и добиваемся того, чтобы пластинка плотно прилегла к поверхности ртути. Мы можем

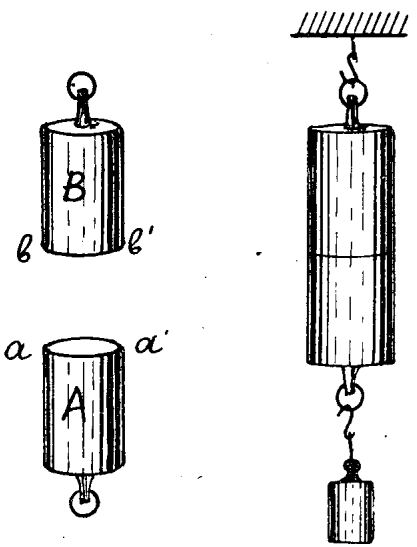


Рис. 75.

теперь положить на другую чашку большое количество разновеса и все-таки пластинка не отрывается—она отрывается при сравнительно значительном дополнительном грузе (в нашем опыте 120 грамм). Это показывает, что, несмотря на очень сильное сцепление частиц ртути между собой (это сцепление превосходит притяжение частиц ртути стеклом: стекло ведь не смачивается ртутью),—притяжение ртути стеклом достигает все-таки значительных размеров. Заменим теперь ртуть водой—пластинка отрывается при значительно меньшем грузе, но зато, при отрывании пластинки от поверхности воды, на стекле остаются капельки воды; это показывает, что в данном случае мы отрывали не стекло от воды, а воду от воды, так что величина груза, вызвавшего отрывание, характеризует в данном случае силу сцепления частиц воды между собой [1]). Кроме того, самый факт появления капель на стекле указывает, что частицы воды притягиваются стеклом сильнее, чем друг другом. И в этом случае так же, как и в опыте со свинцовыми цилиндрами, мы видим, что молекулярные силы проявляются только на очень малых расстояниях.

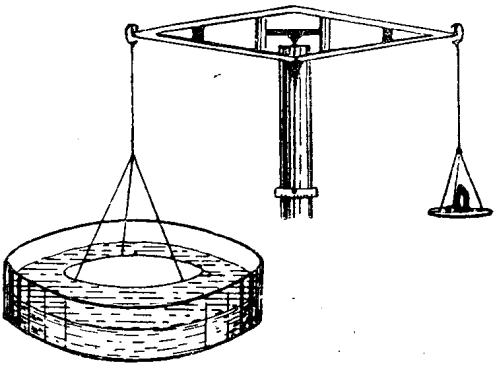


Рис. 76.

Посмотрим теперь, какие мы сможем вывести следствия из самого факта существования молекулярных сил и из той их особенности, что их действие проявляется только на очень малых расстояниях.

Опишем вокруг частицы O, находящейся внутри жидкости, шар (рис. 77) радиусом „заметного действия"; все частицы жидкости, лежащие вне этого шара, никакого действия не производят—молекулярные силы на этом расстоянии уже не сказываются; что же касается частиц, лежащих внутри шара,

[1]) Необходимо помнить, что наши опыты качественного характера: мы констатируем факт существования сил сцепления, а не измеряем эти силы, поэтому числу граммов, наблюдаемому при отрывании, не следует придавать особенного значения.

то они тянут частицу О во все стороны и потому также не производят никакого действия, уравновешивая друг друга. Таким образом, молекулярные силы внутри жидкости ничего особенного не производят. Рассмотрим теперь частицу А, лежащую на самой поверхности жидкости (рис. 77); прежде всего шар, построенный радиусом заметного действия, располагается наполовину в воде, наполовину в воздухе; частица воды А сильнее притягивается частицами воды, чем частицами воздуха—вода более плотное тело, чем воздух; поэтому на данный об'ем частиц воздуха придется меньше. В виду этого частица А будет как бы прижата к поверхности воды. Отсюда ясно, что молекулярные силы производят некоторое добавочное давление. Но, кроме того, на самой поверхности воды будут расположены частицы воды, которые будут тянуть частицу А в разные стороны (см. рис. 77а). То же самое будет происходить с любой частицей, лежащей на поверхности воды или вообще какой угодно жидкости. Такого же рода силы действуют в натянутой на барабане коже. В самом деле, когда мы натягиваем какую либо перепонку—резиновое полотно, пузырь или кожу на кольцо, то мы растягиваем эту перепонку равномерно во все стороны, поэтому на поверхности жидкости действуют силы совершенно такие же, как в натянутой на барабане коже. Отсюда мы приходим к выводу, что поверхность жидкости должна по своим свойствам напоминать упругую натянутую пленку.

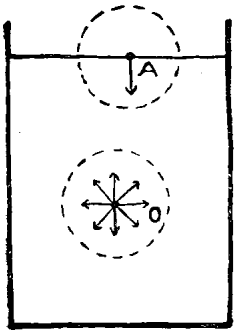


Рис. 77.

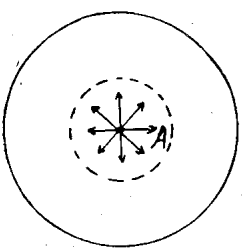


Рис. 77а.

Познакомимся теперь с фактами, подтверждающими этот вывод. Если мы возьмем иголку, потрем ее пальцами, чтобы она покрылась тончайшим слоем жира, и осторожно положим ее на воду в стакане, то она поплывет [1]). Если мы вни-

[1]) Если у кого руки дрожат и кто вообще не умеет осторожно положить иголку, можно посоветовать положить на воду кусок папиросной бумаги и на нее положить иглу. Через некоторое время бумага промокнет и потонет, иголка же останется плавать.

мательно присмотримся к плавающей иголке, то мы увидим, что она находится как бы в маленьком корыте: игла выгибает пленку, которая все-таки выдерживает вес иглы. Весной в канавах и лужах можно видеть т. н. „водомерок", бегающих по поверхности воды. Под каждой лапкой водомерки можно видеть ямочку—углубление в поверхностной пленке.

Переходим теперь к следующему опыту: в картонной коробке, пропитанной парафином, на дне имеется отверстие, закрытое металлической сеткой, предварительно опущенной в расплавленный парафин, вследствие чего проволоки сетки покрываются слоем парафина и не смачиваются водой, отверстия же сетки остаются открытыми. Наша коробка с сеткой имеет вид решета, и вот вопреки ходячему мнению, что воду не стоит черпать решетом, мы можем осторожно налить довольно много воды в нашу коробку, и вода все-таки не выливается сквозь решето. Стоит только, однако, мне дотронуться пальцем до сетки, как из того места, до которого я дотронулся пальцем, вода потечет ручьем. Вода удерживалась теми пленками воды, какие образовались в отверстиях сетки, не смачивавшейся водой. При прикосновении пальцем пленки прорываются, и вода вытекает. С этим явлением, без сомнения, знакомы все, кому приходилось жить в палатках. Если после сухой погоды начинается дождь, то первое время вода удерживается в складках парусины, из которой сделана палатка, но стоит только прикоснуться к тому месту, где над нами на парусине натекла вода, как сейчас же в этом месте парусина начинает „протекать"—мы пальцем прорываем поверхностную пленку. Поверхностная пленка может быть различной прочности в различных жидкостях. В легко испаряющихся жидкостях, как, например, в эфире, она значительно слабее, чем в воде; происходит это оттого, что раз жидкость легко испаряется, то это и значит, что сцепление между частицами невелико, отчего и пленка должна быть более слабой. Этот вывод легко доказать на опыте.

Берем плоский сосуд с водой, посыпаем его спорами плауна; споласкиваем колбу несколькими каплями эфира, отчего она наполняется парами эфира, и осторожно наклоняем отверстие колбы над срединой сосуда с водой: тяжелый пар эфира, падая на воду, растворяется в ней—пленка в этом месте становится более слабой и оттягивается более сильной

чистой пленкой воды, находящейся по краям сосуда; мы замечаем это явление, благодаря присутствию плавающих спор плауна; споры как бы сдуваются от центра к краям сосуда. Это же явление можно показать еще и иначе: к стержню поплавка А (см. рис. 78) сургучем приклеивают сетку В; если осторожно погрузить поплавок так, чтобы сетка коснулась воды, то мы заметим, что поплавок остается погруженным в воду, удерживаясь поверхностной пленкой; стоит, однако, только капнуть эфиром в воду, как сейчас же поплавок разрывает более слабую пленку эфирного раствора и всплывает. Этим же об'ясняются причудливые движения маленьких кусочков камфоры, брошенных на поверхность воды: камфора неравномерно растворяется со всех сторон кусочка, поэтому с различных сторон получается пленка неодинаковой прочности — кусочек камфоры оттягивается в ту сторону, где пленка прочнее, но так как процесс растворения идет непрерывно и в то же самое время неодинаково с различных сторон кусочков камфоры, то место более прочной пленки меняется, отчего и движения происходят по разным направлениям. Это явление удачно об'ясняет движения, наблюдаемые в клетках живых организмов—прежде эти движения об'яснялись капризами „жизненной силы", теперь мы видим, что эти движения можно получить в неживой природе, изменяя поверхностную пленку жидкостей или, как говорят, изменяя ее „поверхностное натяжение".

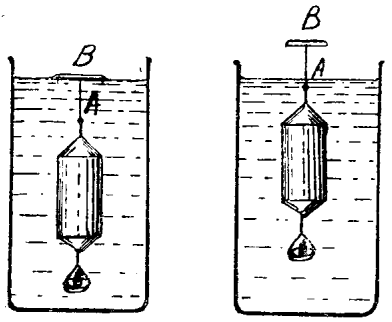


Рис. 78.

В существовании поверхностной пленки убеждает нас также самый факт образования капель; если из какого-либо сосуда через отверстие вытекает жидкость по каплям, то каждая капля постепенно изменяет свою форму (см. рис. 79) до тех пор, пока между отвисающей каплей и отверстием не образуется сужение, где в конце концов и происходит отрыв капли. Пока капля висит, она удерживается исключительно поверхностной пленкой. Правильность этого об'яснения мы

можем подтвердить опытом с искусственной каплей: на большом обруче натягивается резиновое полотно, на это полотно осторожно наливаем ртути. По мере увеличения груза по-

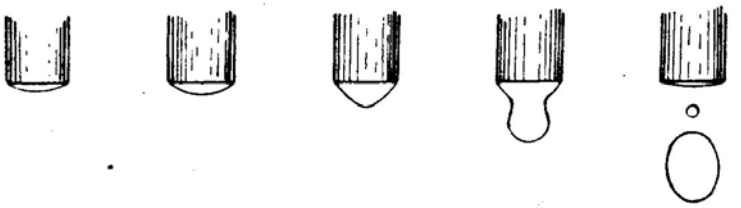


Рис. 79.

лотно выгибается и проходит через все формы, через которые проходит обыкновенная капля (рис. 80), мы прекращаем подливать ртуть в тот момент, когда у „капли" образуется характерная перетяжка, так как после этого „капля" скоро должна „упасть", причем, понятно, резиновое полотно разрывается.

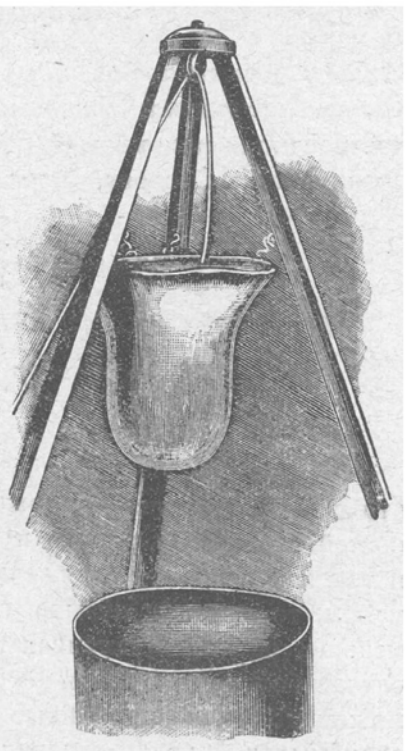


Рис. 80.

Мы до сих пор останавливались на примерах, в которых наглядно выступало сходство между упругой пленкой, скажем, резинового полотна и поверхностным слоем жидкости.

Остановимся теперь на одном опыте, в котором наглядно выступает различие между свойством резиновой пленки и поверхностной пленкой жидкости. На стеклянной трубке с двумя кранами (рис. 81) мы выдуваем два мыльных пузыря: один большой и один маленький. Теперь зададим себе вопрос: что случится, если мы откроем кран В трубки, соединяющей оба пузыря? Некоторые из товарищей, я слышу, подсказывают: маленький пузырь начнет раздуваться, а большой

будет опадать. Мы открываем кран, и, как Вы ясно видите, происходит как раз наоборот! Маленький пузырь спадается, большой растет. В чем здесь дело? Мы невольно, говоря о мыльном пузыре, приписываем ему те же свойства, что и резиновому пузырю. Когда мы надуваем резиновый мешок, то стенки мешка растягиваются, и от этого натяжение их увеличивается. У мыльного же пузыря стенки точно также при раздувании становятся тоньше, но все-таки толщина их значительно больше радиуса заметного действия молекулярных сил. А при этом условии *натяжение пленки остается без изменения*, так как поверхностное натяжение вызывается силами, действующими в тонких поверхностных слоях, почему промежуточные слои и не играют никакой роли. В этом и состоит различие между этими двумя явлениями. Из рис. 82 ясно, почему маленький пузырь производит на заключающийся в нем воздух бо́льшее давление, чем большой. Мы видим, что силы натяжения, приложенные к малым участкам поверхностей пузырей большого и малого, образуют разные углы, и так как величина натяжения одинакова и в большом и в малом, то в малом пузыре, где угол между силами P и P^1 меньше, равнодействующая R_1 оказывается больше, чем в случае большого пузыря R_2. С помощью мыльной воды мы можем получать устойчивые пленки—строго говоря, тонкие слои мыльной воды, ограниченные с обеих сторон поверхностными пленками. На этих мыльных пленках легко можно изучать свойства поверхностных пленок. Так, если мы на проволочном кольце, к которому привязана нитка с петлей *a* (см. рис. 83), получим мыльную пленку, то потом можно осторожно проколоть пленку внутри петли—тогда петля

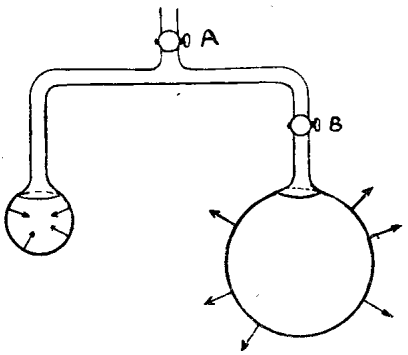


Рис. 81.

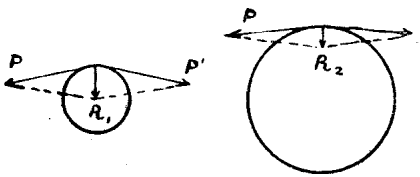


Рис. 82.

растягивается окружающей пленкой в правильное кольцо, что показывает равномерность поверхностного натяжения по всем направлениям. На мыльной воде легко получать пену и изучать ее строение. Строение пены очень похоже на некоторые детали клеточного строения, и поэтому изучение пенистых структур представляет большой интерес для биологии.

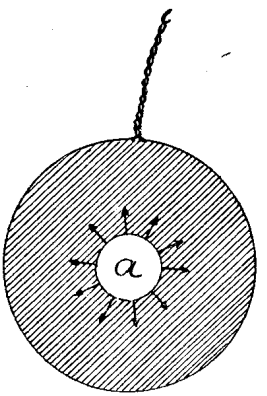
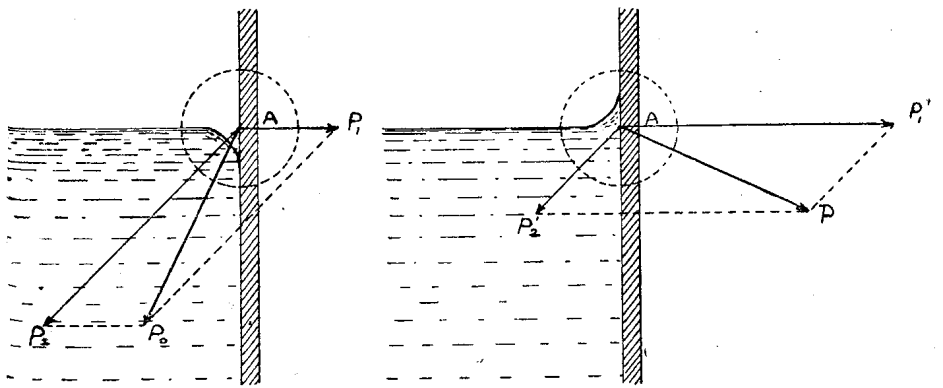


Рис. 83.

Переходим теперь к решению основной задачи, к об'яснению поднятия жидкостей в капиллярных трубках. Рассмотрим сначала частицы жидкости, расположенные в месте соприкосновения жидкости, твердого тела и воздуха. Шар, построенный радиусом заметного действия, будет располагаться наполовину в твердом теле, на одну четверть в воздухе и на одну четверть в жидкости. Действием частиц воздуха можно пренебречь. Действие частиц твердого тела сводится в силе P_1 (см. рис. 84 a и b), действие сил сцепления частиц жидкости к силе P_2. Эти две силы дадут равнодействующую P_0.



a Рис. 84. b

Направление равнодействующей будет зависеть от сравнительной величины сил P_1 и P_2. Если силы сцепления частиц жидкости P_2 значительно больше P_1, то равнодействующая P_0 будет направлена внутрь жидкости. Так как мы знаем, что жидкость может быть в равновесии только тогда, когда

сила образует прямой угол с поверхностью [1]), то отсюда заключаем, что поверхность жидкости должна искривиться так, что в каждой точке поверхности равнодействующая P_0 будет перпендикулярна к поверхности. Если же сила P_1 значительно больше P_2, т. е. если жидкость смачивает твердое тело, то поверхность равновесия получается вогнутая (см. рис.84 b). Таким образом, мы получаем об'яснение выпуклого и вогнутого мениска. Выясним теперь, почему жидкость с вогнутым мениском поднимается в узкой трубке? Мы только что видели, почему в узкой трубке форма поверхности смачивающей трубку жидкости будет иметь вид чашки *авс* (рис. 85). Но, с другой стороны, представим себе: упругую пленку, принявшую форму чашки; ясно, что пленка, сжимаясь, должна принять вид плоской пленки $ав_1с$, но это может случиться только в том случае, если пленка подтянет с собой вверх находящуюся под ней жидкость. С другой стороны, плоская поверхность $ав_1с$ не будет поверхностью равновесия—она должна, как мы видели, принять форму $а_1в_1с_1$; но эта упругая пленка будет стремиться сократиться и принять форму плоской пленки, причем часть жидкости опять приподнимается. Это будет происходить до тех пор, пока вес приподнятого столба жидкости не уравновесит как раз стремления пленки превратиться из вогнутой поверхности в плоскую. Таким образом, здесь непрерывно происходят нарушения равновесия и восстановление его на новой основе [2]). Если мы обозначим через T натяжение пленки, рассчитанное на 1 сантиметр, то вся сила, приложенная к окружности вогнутой чашки, совпадающей с окружностью просвета самой трубки, будет равна $2\pi r$. T. Эта

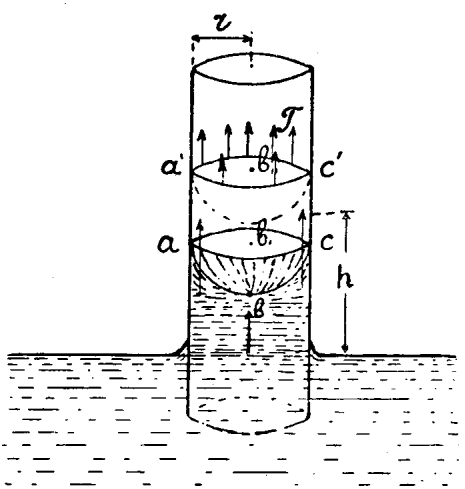


Рис. 85.

[1]) См. лекция VII.

[2]) Дальнейший расчет можно пропустить тем читателям, которым трудно производить алгебраические вычисления.

сила должна равняться весу столба приподнятой жидкости, а этот вес равняется об'ему цилиндра $\pi r^2 h$ (произведение площади основания на высоту), умноженному на плотность и на ускорение силы тяжести: $\pi r^2 hdg$. Итак, равновесие будет при равенстве этих двух сил $2\pi rT = \pi r^2 hdg$ или, после сокращений, $h = \frac{2T}{rdg}$. . . (А). Мы получили математическую формулу, определяющую высоту поднятия жидкости в трубке в зависимости от радиуса трубки r, от величины поверхностного натяжения T, от плотности жидкости и от ускорения силы тяжести g. Мы видим, что чем уже трубка, тем выше будет поднятие уровня h (высота h показывает, насколько уровень повышен по сравнению с уровнем в широком сосуде, в который вставлена трубка). Если мы измерим просвет трубки и высоту, на которую поднимается жидкость, плотность которой нам известна, то ф-ла (А) дает нам возможность определить величину поверхностного натяжения, выраженную в динах на один сантиметр. Подобным же образом вычисляется глубина h, на которую опускается выпуклый мениск ртути. Разница только в том, что в ртути равнодействующая сил натяжения пленки направлена вниз, т. е. в сторону действия силы тяжести. Таким образом, разрешается противоречие с основными законами равновесия жидкостей. Закон остается в силе, *противоречие получилось потому, что мы не приняли во внимание сил поверхностного натяжения.* Пока мы изучали равновесие в широких сосудах, влияние этой силы было ничтожно. В сосудах же с узким просветом роль поверхностного натяжения становится весьма значительной.

Как мы уже указывали, действием сил поверхностного натяжения об'ясняется перемещение воды в пористой массе, из которой состоит почва; высота поднятия определяется степенью разрыхления. Этим же об'ясняется поднятие жидкостей в фитилях ламп и свечи, а также и действие пропускной бумаги и обыкновенной тряпки, которой мы вытираем пролитую воду. Если жидкость очень сильно смачивает твердое тело, то пленка может подняться очень высоко вдоль стенок сосуда. Этим об'ясняется, например, хорошо известный факт, что наполненная керосином лампа бывает покрыта тонким слоем керосина даже снаружи; тонкая пленка

поднимается по стенкам сосуда, проходит сквозь не туго завинченную горелку внаружу и обволакивает наружную сторону лампы.

В заключение рассмотрим случай соприкосновения трех жидкостей I, II и III (см. рис. 86). Мы имеем три пленки: одна на границе I—III с натяжением T_{13}, другая на границе I—II с натяжением T_{12} и, наконец, третья —на границе II—III с натяжением T_{23}. Если $T_{13} > T_{12} + T_{23}$, то слой жидкости II будет растекаться вдоль границы I—III. Это случай масла, воды и воздуха (одно из тел I, II, III может быть газообразным или твердым). Если $T_{13} < T_{12} + T_{23}$, то жидкость II собирается в сплюснутые капельки, как, например, глазки жира на супе или щах. Если же жидкости, соприкасающиеся подобным образом, растворяются друг в друге или вступают друг с другом в химические соединения, то натяжение пленок непрерывно меняется и соприкасающиеся жидкости приходят в движение, принимающее порой очень сложные формы. Рассмотрим один очень интересный случай таких движений. В слабый раствор азотной кислоты мы помещаем капельки чистой ртути и бросаем несколько кристалликов двухромовокислого калия. При помощи фонаря мы отбрасываем изображение сосуда на экран. Вы видите, как, благодаря растворению кристалликов, вокруг них появляется желтоватое облачко; как только это облачко доходит до капель ртути, капли начинают извиваться и быстро двигаются по направлению к кристалликам; ударяются о кристаллики, отскакивают, вновь налетают на них. Глядя на эту причудливую картину, трудно отделаться от мысли, что это капли ртути и кристаллы. До такой степени картина напоминает нападение одних живых существ на другие! Движения нам кажутся произвольными, происходящими по обдуманному плану. Едва ли надо указывать Вам, какое значение имеют подобные опыты для изучения движений простейших организмов, и насколько они вырывают почву у тех, кто верит в существование „жизненной силы", капризами которой об'ясняется все, что происходит в живых организмах. Ведь никто же не станет утверждать, что эти, как бы намеренные-

Рис. 86.

движения капель ртути об'ясняются ее желаниями, ее инстинктами? Таким образом, рассмотренные нами сегодня вопросы играют громадную роль в биологии, по этой причине и мы посвятили им целую лекцию, чтобы помочь тем товарищам, которые с Вами ведут занятия по биологии.

ЛЕКЦИЯ ДЕВЯТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Ощущения тепла и холода. Об'ективная оценка температуры. Расширение тел при нагревании. Практические применения. Электрические термометры—термоэлементы. Теплопроводность и конвекция.

Мы сегодня приступаем к изучению новой главы физики —к изучению явлений тепла и холода. Многим из Вас может показаться, что мы с Вами делаем сегодня совершенно неожиданный скачек в новую область, не имеющую, повидимому, ничего общего с тем, о чем у нас шла речь до сих пор. В самом деле, представление о чем-нибудь теплом или холодном обыкновенно никогда не связывается у нас с представлением о движении. Но мы скоро увидим, что то, что мы называем теплом, об'ясняется движением частиц—атомов и молекул, из которых построено все, что мы видим вокруг себя—вся материя. Чем быстрее движение частиц в каком-либо теле, тем горячее оно нам будет казаться на ощупь. Но об этом у нас будет речь впереди. Прежде, чем приступить к об'яснению какого-либо явления, его надо сначала внимательно и всесторонне изучить. В житейской практике мы определяем тепло и холод на ощупь, дотрагиваясь частями нашего тела к исследуемому предмету, поэтому чувство тепла и холода часто смешивают с осязанием, хотя по существу ощущение чего-то твердого, мягкого или липкого, гладкого или шероховатого резко отличается от ощущения холода и тепла. На поверхности нашего тела имеются небольшие области, т. н. „теплые точки", наряду с „холодными".

Так, если мы приложим очень маленькую плоскую поверхность, нагретую слегка больше, чем наше тело, к одной из т. н. „теплых точек" на нашей коже, то мы испытываем определенное ощущение чего-то теплого.

Если же мы перейдем с теплой на холодную—то решительно не получается никакого ощущения, ни тепла, ни холода—мы имеем дело с чистым осязанием, т. е. с ощущением прикосновения какого-то предмета к нашей коже. Наоборот, прикосновение чем-нибудь более холодным [1]), чем наше тело, вызывает ощущение холода только тогда, когда мы прикасаемся к „холодной" точке. Если же прикасаться к телу чем-нибудь сильно нагретым, то возбуждаются и теплые и холодные точки. Если войти в горячую ванну, то получается так называемая „гусиная кожа"—явление, обычно наблюдаемое при возбуждении холодных точек. При соприкосновении с чем-нибудь очень теплым возбуждаются, следовательно, и теплые и холодные точки. Итак, у нас имеются специальные органы для восприятия тепла и холода, очень ценные для нас в обыденной жизни, но неспособные служить основой для научных исследований. В самом деле, представим себе человека, пришедшего с мороза и опустившего руку в кружку с водой, стоящую на столе в хорошо натопленной комнате—ему вода всегда покажется теплой, в то время, как для человека, мешавшего печь кочергой, та же вода покажется холодной. Наши ощущения зависят в значительной степени от того, в каком состоянии мы сами находимся. Для того, чтобы организм уберегался от холода и большого жара, наших ощущений вполне достаточно, но человек не является пассивным продуктом природы. Он сам изменяет ту обстановку, в которой он живет и косвенно через эти измененные условия жизни изменяет самого себя. Вот для этого активного воздействия на природу нам не хватает наших ощущений, дающих суб'ективную оценку тепла и холода, зависящую отчасти от того состояния, в котором человек находится в данную минуту. Поэтому мы ищем об'ективной оценки степени тепла и холода или „температуры". Такую об'ективную оценку дает нам обыкновенный ртутный термометр. Действие термометра основано на расширении ртути

[1]) Разница между температурой тела и холодным телом не должна быть очень велика.

при нагревании и притом расширении более сильном, чем расширение твердого тела, — того стекла, из которого сделана трубка термометра. Термометр изготовляют следующим образом. Наливают в воронку a (см. рис. 87) чистой ртути и подогревают в шарике b воздух, который, расширяясь пузырьками, выходит сквозь ртуть. После этого дают трубке остынуть—ртуть отчасти входит в шарик b. Эту операцию проделывают несколько раз, пока шарик b и трубка c не наполнятся ртутью. Затем сильно подогревают ртуть и оставляют при той температуре, выше которой не предполагают измерять с данным термометром, отрезают воронку a и запаивают трубку c. Опыт показывает, что ртуть в трубке с останавливается всегда против некоторой метки 0 (см. рис. 87), если мы шарик b погрузим в тающий лед или снег, и против метки 80 и 100, если шарик находится в парах кипящей воды при атмосферном давлении в 760 м/м ртутного столба (см. лекцию VII). Таким образом, мы определяем две постоянные температуры, не зависящие от наших ощущений. Эти две температуры мы совершенно условно обозначаем 0° градусов и 100° градусов, если мы собираемся сделать термометр Цельсия, и 0° и 80°, если мы изготовляем термометр Реомюра. В научных исследованиях принята скала Цельсия. Промежуток между этими двумя „постоянными точками" термометра разделяется на 100 частей или градусов Цельсия или на 80 градусов Реомюра. Такие же деления наносятся и ниже нуля—это градусы мороза [1])—и выше 100 градусов. Термометр позволяет нам производить оценку температуры об'ективно, т. е. вне зависимости от наших ощущений тепла и холода. Термометр, если он не особенно велик и не содержит много ртути, быстро прогревается и принимает температуру тех предметов, с которыми он со-

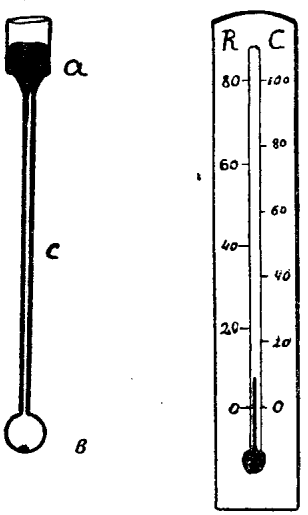


Рис. 87.

[1]) Если требуется измерять очень низкие температуры, при которых замерзает ртуть, то вместо ртути наполняют трубку термометра спиртом.

прикасается, в отличие от нашего собственного тела, поэтому состояние самого термометра не играет роли—его показания всегда одни и те же, если одинаково состояние тех предметов, с которыми он соприкасается. С помощью термометра можно детально изучать законы расширения твердых, жидких и газообразных тел. Прежде всего мы замечаем, что твердые тела расширяются очень мало: надо прибегать к специальным приемам, чтобы обнаружить самый факт расширения твердого тела. Так, шарик А (рис. 88), который я держу сейчас за цепочку и который свободно проходит сквозь кольцо В, при нагревании на горелке так мало расширяется, что даже самый зоркий глаз ничего не увидит. Однако, Вы все видите, что он действительно расширился, так как он теперь уже через кольцо не проходит. Расширение при нагревании очень мало: так, если мы поместим латунную линейку, находившуюся при нуле градусов, в ванну с водой при температуре в +1° (см. рис. 89) Цельсия, то длина линейки, предположим, равная одному метру при 0°, увеличится на 18 тысячных долей миллиметра. Измерять такие удлинения можно только с помощью микроскопов, укрепленных на солидных каменных подставках, как показано на рис. 89. Увеличение длины линейки в один метр при нагревании на 1 градус Ц. называется коэффициентом линейного расширения того вещества, из которого сделана линейка. Знать эти величины необходимо инженерам, так как все наши сооружения: мосты, машины и здания подвергаются сильным изменениям температуры; различные части наших сооружений,

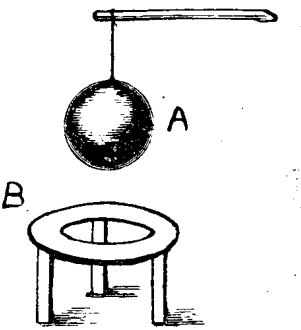


Рис. 88.

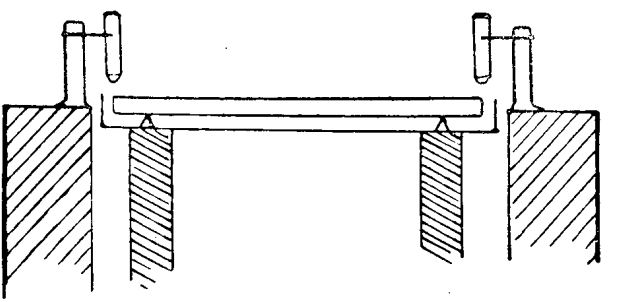


Рис. 89.

сделанные из различных веществ, неодинаково расширяются, вследствие чего при неправильной конструкции может произойти серьезное разрушение. Чтобы избежать последствий расширения железно-дорожного моста, прибегают, например, иногда к следующей конструкции. Основная часть моста—мостовая ферма А опирается на небольшие железные цилиндры OO^1 (см. рис. 90), которые свободно лежат в цилиндриче-

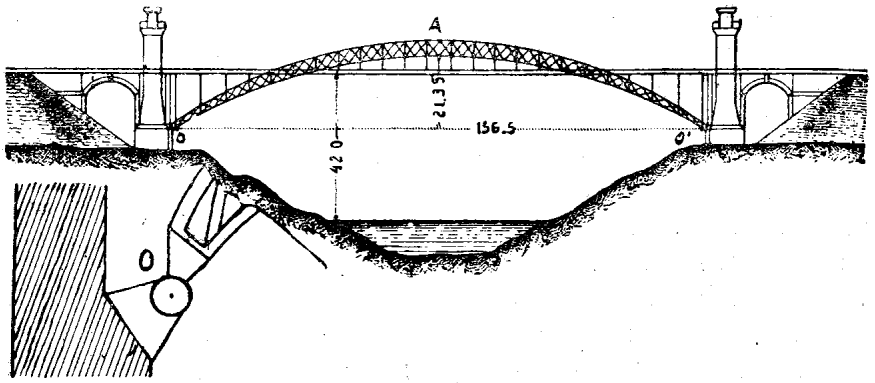


Рис. 90.

ских углублениях железных плит, прикрепленных к каменным устоям (см. рис. 90—налево внизу рисунка показан цилиндр лежащий в углублении плиты). При нагревании мостовая ферма изгибается, и концы ее поворачиваются вокруг осей цилиндров OO^1. Поворот этих цилиндров хорошо заметен, например, на мостах окружной дороги через реку Москву, около Ново-Девичьего монастыря и окого Нескучного Сада, если заметить какую-нибудь метку на цилиндре и наблюдать ее положение рано утром и после полудня в жаркий солнечный день. Что при этих расширениях и сжатиях проявляются громадные силы, можно показать на следующем опыте. Толстый железный брусок В закрепляется в чу-

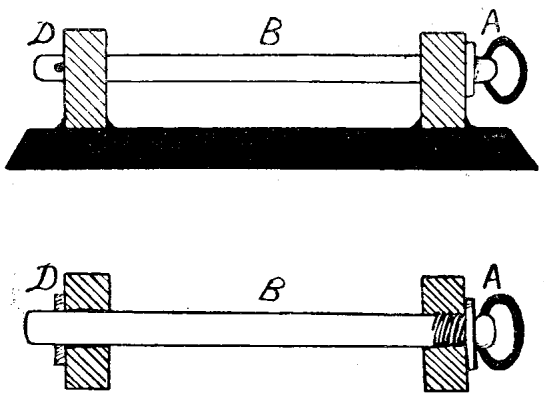


Рис. 91.

гунной литой подставке с одной стороны при помощи солидной гайки A (рис. 91), с другой—с помощью чугунного или стального стержня D около 1 сантиметра в поперечнике, вставленного в отверстие, сделанное в конце бруска B. Железный брусок предварительно сильно нагревается, быстро укрепляется в чугунной подставке и подтягивается гайкой. Если теперь его быстро охладить холодной водой, то при сокращении бруска чугунный стержень ломается. Величину действующих здесь сил можно рассчитать следующим образом. На железной проволоке достаточно большой длины мы делаем две метки A и B (рис. 92) и с помощью двух микроскопов определяем, насколько удлиняется проволока при той или другой нагрузке. Нижняя метка B смещается сильнее потому, что ее смещение зависит как от растяжения верхней части проволоки выше метки A, так и от растяжения куска AB. Вычитая из смещения B смещение A, мы находим растяжение проволоки L, находящейся между двумя метками. Опыт показывает, что это растяжение зависит от вещества проволоки, от величины растягивающего груза и от площади поперечного сечения проволоки. Зная толщину бруска и зная, насколько он удлиняется при нагревании на данное число градусов, мы можем рассчитать, с какой силой надо было бы его тянуть, чтобы он растянулся настолько же, насколько он удлиняется при нагревании. Для этого надо знать, во сколько раз сечение бруска больше сечения проволоки, с которой мы производим опыты с растяжением; при этом предполагается, что свойства проволоки не изменились по сравнению с бруском, иначе опыты с растяжением надо производить с более толстыми проволоками. При этих расчетах получаются громадные цифры, показывающие, насколько велики силы сцепления между

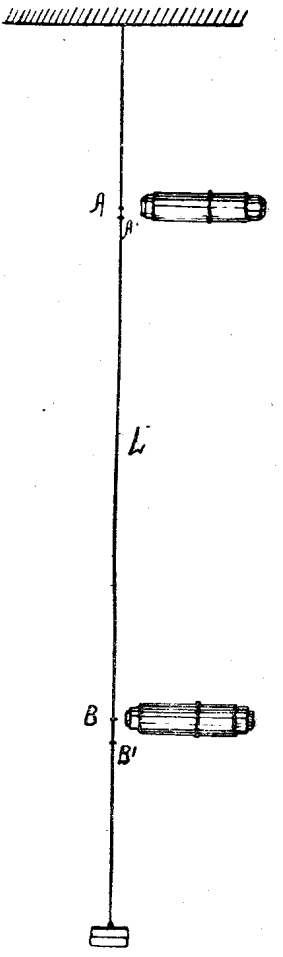


Рис. 92.

отдельными частицами твердых тел, проявляющиеся при расширениях и сжатиях. Поэтому с ними и приходится считаться инженерам при постройке тех или других сооружений. Как известно, железнодорожные рельсы укладываются с промежутками на стыках в расчете, чтобы при расширении от нагревания рельсы не изгибались. Большое недоумение часто вызывает факт, что рельсы электрического трамвая прикладываются друг к другу без малейших промежутков. При этом надо принять в расчет, что рельсы в городах иногда укладываются на металлических шпалах, и, кроме того, большая часть их вплотную соприкасается с мостовой, таким образом, получается как бы сплошная плита, состоящая из веществ, приблизительно с одинаковым коэффициентом расширения.

Что касается расширения жидкостей, то, как мы уже видели на примере термометра со ртутью и спиртом — это расширение значительно более сильное, чем расширение твердых тел; действительно, уровень ртути может повышаться в трубке термометра только в том случае, если емкость стеклянной трубки с шариком увеличивается при нагревании меньше, чем об'ем ртути. Я беру сейчас большую колбу, наполненную доверху подкрашенной водой — вода заполняет даже часть трубки, плотно вставленную в пробку, которой закрыта колба. Я опускаю трубку (рис. 93) в горячую воду: Вы видите—уровень воды в трубке немного опустился. Это произошло потому, что сначала прогревается стеклянный сосуд,—он расширяется, его емкость становится больше, а жидкость еще не прогрелась. Но вот теперь прогрелась уже и вода, и так как она расширяется значительно сильнее стекла, уровень ее в трубке быстро повышается. Расширение газов еще более значительно, чем расширение жидкостей. Мы этим свойством газа уже пользовались на второй лекции, когда нам надо было пользоваться „термоскопом" для обнаружения тепла, выделяющегося в куске свинца при ударах молота. Мы берем сейчас другую колбу, закрытую пробкой, через отверстие которой входит длинная стеклянная трубка, доходящая до дна колбы (см. рис. 93). На дне колбы налито немного подкрашенной воды, остальная часть колбы заполнена воздухом. Вы видите, что стоит только мне прикоснуться рукой к колбе, как сейчас же уровень

воды в трубке повышается. Достаточно, следовательно, очень небольшого нагревания, которое я произвожу рукой, чтобы вызвать заметное расширение воздуха. Я помещаю колбу теперь в горячую воду, и вы видите—вода сразу поднялась до верху трубки и начала переливаться через край. Вы уже из лекций по химии знаете, что при нагревании все газы расширяются, приблизительно, одинаково, именно—при нагревании на 1° градус Цельсия об'ем газа увеличивается на 1/273 часть того об'ема, который он имел при 0° Цельсия.

В современной технике и в научных исследованиях иногда требуется знать температуру с очень большой точностью: приходится определять десятые и сотые доли градуса. Этого можно достигнуть, сделав трубку термометра достаточно узкой, тогда при ничтожном изменении об'ема ртути в шарике столбик ртути будет подниматься или опускаться на значительную высоту, поэтому перемещение на один градус будет настолько велико, что деление в один градус можно будет разделить на большое число частей. В таких случаях, однако, термометры позволяют производить измерения на очень небольшом протяжении—на скале термометра умещается небольшое число градусов, поэтому приходится пользоваться целым набором термометров, рассчитанных для различных областей температуры. Чтобы предохранять такие термометры от порчи, в верхней части трубки над последним делением термометра раздувается шарик, куда выльется ртуть, если мы как-нибудь случайно нагреем термометр выше той температуры, на которую он был рассчитан.

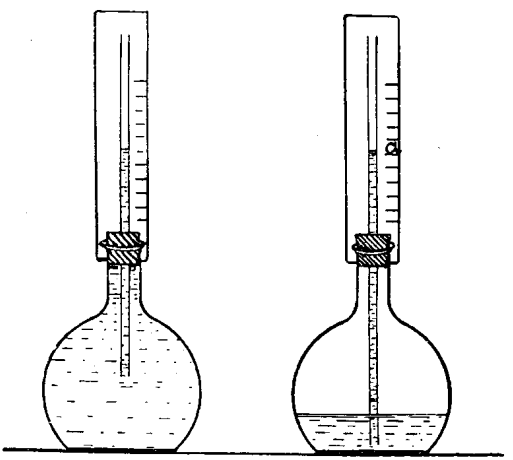


Рис. 93.

Но еще большей чувствительностью обладают электрические термометры или так называемые термоэлементы. Рас-

смотрим сейчас устройство измерителя электрического тока или гальванометра. На деревянную катушку А (см. рис. 94) намотана т. н. „изолированная", т. е. обернутая материей, непроводящей электрического тока, проволока. Концы этой проволоки С заплетены в шнурок, на котором и висит катушка. Чтобы удобнее было следить за поворотом катушки, в нее вставлена длинная бумажная гильза В. Катушка подвешена между концами большого стального подковообразного магнита. Если мы теперь к концам проволоки прикрепим с помощью зажимов медную и цинковую пластинку (см. рис 94) и опустим их в стакан с слабым раствором серной кислоты, то мы замечаем быстрый поворот катушки. Если мы вынем пластинки из кислоты, катушка возвращается в первоначальное положение. Две пластинки—медная и цинковая, погруженные в раствор серной кислоты, представляют собой простейший источник тока или гальванический элемент. Стальной магнит с вращающейся между его концами или т. н. „полюсами" катушкой является измерителем или показателем электрического тока. Поворот катушки происходит всякий раз, когда по проволоке идет электрический ток. Если мы обменяем пластинки, т. е. к тому концу проволоки, к которому была привернута медная пластинка, привернем цинковую и наоборот и опять погрузим в раствор серной кислоты, то при погружении пластинок в раствор серной кислоты катушка поворачивается в другую сторону. Мы говорим, что ток идет теперь в обратном направлении. Сейчас мы возьмем более чувствительный прибор для измерения тока или т. н. гальванометр. Чувствительность достигается тем, что катушка висит на очень тонкой проволоке, а ток подводится по тонким спиральным пружинкам p и q (см. рис. 95). За поворотом катушки мы следим по перемещению светлого пятнышка, образованного лучом света, иду-

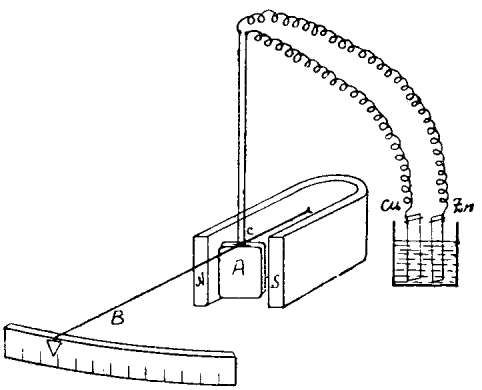


Рис. 94.

щего от электрической лампы и отраженного от зеркальца, прикрепленного к вращающейся катушке. Малейший поворот катушки вызывает большое перемещение светлого пятна на стене. В качестве источника тока мы берем две проволоки — железную Fe и медную Cu, концы которых припаяны друг к другу,— остающиеся же свободные концы присоединяются к проволокам, идущим к гальванометру. Оказывается, что если мы будем нагревать или охлаждать спай двух металлов C, то сей час же гальванометр обнаруживает электрический ток. Мы затемняем аудиторию, чтобы Вам виднее было перемещение светлого пятна на стене. Я прикасаюсь пальцами к спаю, и вы видите, как пятно быстро перемещается. Я погружаю теперь спай в стакан со снегом, светлое пятно идет в другую сторону; при охлаждении, следовательно, ток идет в обратном направлении. Если мы приготовим воду, которая будет иметь температуру на один градус выше температуры комнаты, и заметим, какое перемещение светлого пятна это вызовет, то мы сможем на стене сделать деления, соответствующие градусам, и так как эти деления окажутся очень крупными, то их можно будет подразделить на очень маленькие доли и, таким образом, измерять малые доли градуса. Взяв достаточно тонкие проволоки, спаянные между собою, и достаточно чувствительный гальванометр, можно измерять миллионные доли градуса! Этим способом астрономы измеряют тепло, посылаемое земле лучами отдельной звезды.

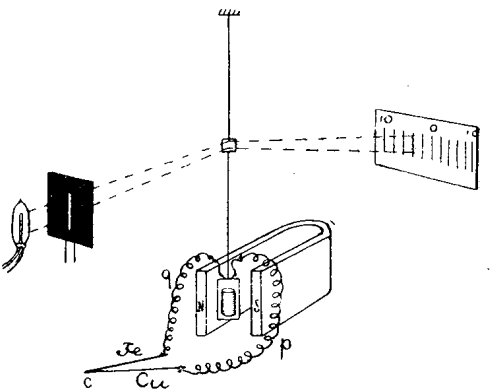


Рис. 95.

Если мы возьмем гальванометр значительно менее чувствительный, а в качестве „термоэлемента“ возьмем сваренные между собой концы двух различных тугоплавких проволок [1]), то мы сможем измерять высокие температуры до 1200°. Такого рода термоэлементы играют сейчас большую

[1]) На практике часто берут платиновую проволоку и проволоку из сплава платины и родия или платины и ирридия.

роль при изготовлении стали и при ее закалке. Некоторые высокие сорта стали, особенно сталь для изготовления магнитов или напильников требует при закалке определения температуры с большой точностью. Поэтому электрический термометр или „пирометр" (от греческого слова пюр—огонь; пирометр—измеритель жара) является необходимой принадлежностью всякого сталелитейного завода, изготовляющего высокие сорта стали.

Мы уже познакомились на второй лекции с измерением количества тепла—с измерением калорий. Выясним, какая разница между температурой, измеряемой термометром, и количеством тепла, измеряемым калбриями; ведь и калории, если Вы помните, мы измеряли по повышению температуры килограмма воды, налитой в калориметр? Термометр нам показывает непосредственно, насколько нагрелось или остыло данное тело; он показывает, как изменилось его тепловое состояние, но, чтобы узнать, сколько для этого потребовалось калорий, мы должны знать, сколько граммов вещества мы нагревали или охлаждали, и, кроме того, должны знать, во сколько раз больше или меньше тепла требуется для нагревания грамма этого вещества по сравнению с таким же весовым количеством воды, т. е. нам надо знать т. н. удельное тепло данного тела. Итак, удельное тепло данного вещества измеряется количеством калорий (больших или малых—см. II лекцию), требующихся для нагревания одного грамма этого вещества на 1° Цельсия. Для воды—эта величина равна по условию единице: мы ведь определили малую калорию, как количество тепла, необходимое для нагревания одного грамма воды на 1° Цельсия [1]). Если мы сообщим одну калорию одному килограмму воды, то повышение температуры будет на 1°, если же мы одну калорию сообщим 2 килограммам, то повышение температуры будет всего в $^1/_2$°. Если же одну калорию сообщить одному килограмму ртути, то температура ее поднимется на 33,3° Цельсия, потому что удельная

---

1) Более точное определение калории будет—количество тепла, необходимое для нагревания одного грамма воды от 14,5 до 15,5 градусов Цельсия, так как, строго говоря, при нагревании на 1° требуется не вполне одинаковое количество тепла, будем ли мы нагревать от 0° до 1°, от 5° до 6° и т. д., но различия эти ничтожны и с ними приходится считаться только в научных исследованиях и то только в немногих случаях, когда требуется очень большая точность.

теплота (теплоемкость) ртути 0,03. Отсюда ясно, что само по себе повышение температуры не дает никаких указаний на то, какое количество тепла было для этого использовано, надо, кроме того, знать, в каком количестве вещества произошло это повышение температуры и какова удельная теплота [1]) этого вещества. Таким образом, измерение количества тепла слагается из взвешивания тела, определения удельного тепла и определения температуры. Большой интерес представляет подсчет того количества тепла, которое расходует человек при тех или других видах труда за сутки. Механическую работу, которую производит человек, можно измерить так же, как мы измеряли вообще всякую работу (см. II лекцию). Об измерении работы машин мы еще будем говорить. При всякой работе человек сильно разогревается; даже в отсутствии всякой работы—во сне человек выделяет большие, сравнительно, количества тепла для поддержания нормальной температуры — около 37°С. Чтобы измерить этот расход, Атвотером в Америке был построен целый ряд калориметров в виде небольших комнат, в которых можно поместить человека, и где он может производить какую угодно работу. Стенки этих комнат-калориметров двойные (рис. 96), между ними все время течет вода, кроме того, имеется ряд защитных оболочек для предотвращения быстрого остывания. С помощью термоэлементов измеряется температура воды, притекающей t_1 и вытекающей t_2; зная количества протекшей воды M и повышение температуры $t_2 - t_1$, можно определить количество калорий $M.(t_2 - t_1)$, сообщенное воде за известный промежуток времени. Так как в калориметре не было другого источника тепла, кроме человека,

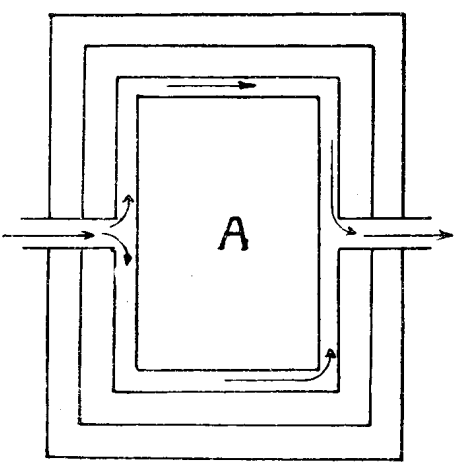


Рис. 96.

[1]) Измерение удельной теплоты (теплоемкости) см. „Пособие к занятиям по физике".

то, следовательно, все тепло, сообщенное воде, было выделено человеком. Оказывается, что $^4/_5$ всего тепла, заключенного в пище, идет на нагревание нашего тела и только $^1/_5$ идет на физическую и умственную работу. На умственную работу, даже самую напряженную, требуется сравнительно очень малое число калорий—за то требуется более продолжительный отдых. Количество тепла, заключенного в пище, определяется таким же способом, как и теплотворная способность топлива (см. II лекцию), т. е. путем сжигания отвешенного количества пищи в калориметрической бомбе и определения повышения температуры воды калориметра. Приводим таблицу калорий, заключенных в одном фунте следующих пищевых продуктов:

Белый хлеб	1200	кал.	(больших).
Черный „	1170	„	„
Картофель	295	„	„
Сахар	1250	„	„
Ветчина	1635	„	„
Шоколад	5625	„	„

Для взрослого человека при 10-часовом рабочем дне и при умеренном физическом труде требуется около 3700 больших калорий. Расчет пищи по калориям можно сделать, конечно, в одном предположении — именно, что вся пища нацело усваивается, а это зависит как от состояния здоровья, так и от способа приготовления: вкусная пища усваивается лучше.

Познакомимся теперь с явлениями передачи тепла. Мы различаем три способа передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и излучение. Типический пример теплопроводности—передача тепла по веществу ложки, когда мы держим ее пальцами за один конец, а другой опускаем в стакан с горячим чаем. Через некоторое время мы начинаем ощущать тепло. Тепло, следовательно, передается по веществу самой ложки. Возьмем другой пример: мы зажгли свечку и держим руку на расстоянии 20—30 сантиметров над свечкой—мы ясно ощущаем приток тепла, здесь тепло переносится вместе с нагревшимся воздухом. Над горячей свечой или лампой всегда устанавливается ток горячего воздуха. Таким образом, здесь тепло переносится вместе с веществом. Это явление носит название конвекции. Наконец, излучением называется передача тепла через большое пространство без участия

вещества в обычном смысле этого слова, находящегося в промежутке между источником тепла и наблюдателем. В самом деле, между отворенной дверцей раскаленной печи и наблюдателем можно поставить стеклянный сосуд, из которого насосом выкачан воздух, и все-таки ясно чувствуется тепло. Тепло от солнца достигает земли, также пройдя громадное пространство, где нет воздуха и других знакомых нам видов материи. Самое явление излучения тепла, как это теперь выяснено, имеет очень много сходного с распространением света и происходит в т. н. эфире, т. е. в той же среде, в которой происходит передача света, волн радио-телеграфа и т. д., поэтому мы отложим изучение этого явления до тех пор, когда у нас на очереди станет вопрос о распространении света, а пока займемся теплопроводностью и конвекцией. Теплопроводность всего легче изучать в твердых телах. В качестве примера на использование явления теплопроводности, рассмотрим действие предохранительной лампы английского химика Деви, которой пользуются в рудниках. Мы зажигаем лампу (см. рис. 97), накрываем ее сеткой А и завинчиваем оправу. Роль рудника с воспламеняющимися газами у нас будет выполнять большой стеклянный цилиндр, сполоснутый небольшим количеством эфира: он весь наполнен парами эфира. Опускаем лампу: пламя несколько раз потрескивает и потухает. Почему? Внутри сетки происходит вспышка, она нагревает сетку А, но вследствие большой теплопроводности сетки тепло сразу распространяется на всю сетку, при этом температура поднимается не сильно, так как тепло распространилось на большое количество вещества, и прилегающие к сетке снаружи слои пара эфира не нагреваются до температуры воспламенения, отчего взрыв и ограничивается внутренней частью лампы. Так как воздух заменяется паром эфира, то пламя от отсутствия кислорода гаснет. Теперь посмотрим, что случится, если в нашем руднике зажечь спичку. Я зажигаю спичку и бросаю в цилиндр. Вы видите—над цилиндром вспыхивает громадное пламя;

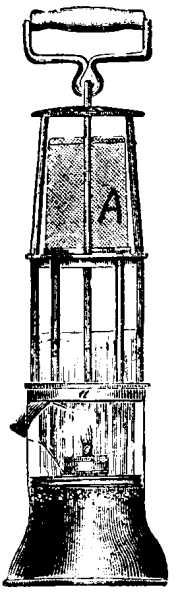


Рис. 97.

чтобы потушить этот пожар, я набрасываю большую тряпку. Вы видите, что в данном случае мы используем большую теплопроводность металла для того, чтобы предотвратить распространение вспышки горючих газов. Чтобы изучить теплопроводность жидкостей и газов, необходимо принимать меры, чтобы устранить конвекцию. Я беру пробирку с водой и нагреваю ее снизу. Вы видите, что вся вода закипает по всей длине пробирки. Я беру другую пробирку, помещаю на дно ее лед, накрываю его металлической сеткой, чтобы он не всплывал, наливаю воды и начинаю подогревать, на этот раз, однако, в верхней части пробирки. Вы видите, вода закипает только сверху, внизу же остается лед, так как теплопроводность воды очень невелика, и тепло еще не дошло до льда, хотя верхние слои воды уже кипят. Во втором случае мы устранили конвекцию —горячая вода легче, она всплывает поверх холодной, поэтому, когда мы грели пробирку снизу, она непрерывно перемешивается—происходит явление конвекции—и она очень быстро согревается во всей массе. Воздух и вообще газы, за исключением водорода, обладают малой теплопроводностью. Теплая одежда, мех, вата, шерстяные ткани содержат большое количество воздуха и потому в сильной степени предохраняют наше тело от остывания. Чем более рыхлая ткань, тем она теплее, т. е. тем больше она задерживает тепло, выделяемое нашим телом. Поэтому не следует сильно сжимать шерстяную материю (две пары шерстяных носков в узком сапоге менее защищают от холода, чем одна в свободной обуви).

Явление конвекции можно очень хорошо наблюдать на следующем приборе. На дне ванночки с плоскими боковыми стенками помещается проволочка, по которой я могу пустить электрический ток и тем нагреть ее. На проволочке лежит несколько кусочков краски, и Вы видите, как вода вблизи проволочки окрашена. Я пускаю ток, и Вы видите, как над проволокой поднимается струя окрашенной воды, и как эта струя выгибается в разные стороны и опускается вниз по краям сосуда. У нас устанавливается круговорот—циркуляция. Такого рода круговорот происходит в трубках и котле центрального водяного отопления. На рисунке 98 изображена схема водяного отопления. Нагревшаяся и расширившаяся в котле вода поднимается по стоякам вверх

и вытесняет остывшую в трубах и „батареях“ воду, которая, благодаря общему наклону труб, стекает обратно в котел, где она вновь подогревается и поднимается вверх: у нас устанавливается постоянный круговорот. Такого рода круговорот происходит в громадном масштабе в атмосфере. Воздух неравномерно прогревается в различных местах; так, камень, песок и луга прогреваются сильнее леса, вследствие чего прилегающие к сильно прогретой почве слои воздуха и водяных паров нагреваются, расширяются и всплывают наверх над более холодными слоями воздуха, на их место притекает более холодный воздух из тех мест, где он менее прогрелся. Ток этого воздуха представляет собой ветер. Поднявшийся теплый воздух, богатый водяными парами, в высоких слоях атмосферы охлаждается, и водяные пары сгущаются в капельки, образуя облако. На рис. 99 изображено облако, образовавшееся от восходящего тока нагревшегося воздуха в летний день. Восходящий ток горячего воздуха и газов, образовавшихся при горении, непрерывно происходит при топке котлов в фабричных трубах. В благоустроенной топке большого котла должна быть устроена в трубе заслонка, при помощи которой можно изменять отверстие внутреннего канала фабричной трубы в зависимости от того, как горит топливо. Если разведен небольшой огонь, то отверстие должно быть меньше, чтобы количество притекающего воздуха было меньше: воздуха должно притекать столько, чтобы *весь его кислород был использован* на горение. Если воздуха притекает больше, то наша топка производит совершенно лишнюю работу прогревания и прокачивания сквозь трубу воздуха, на это затрачивается тепло, получающееся при сгорании топлива. Если мы заслонку закроем

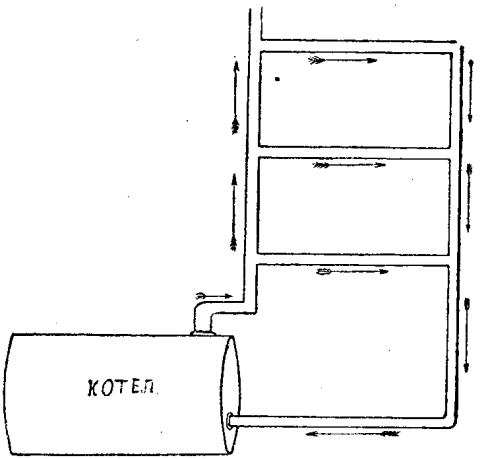


Рис. 98.

больше, чем нужно—кислорода не хватит, будет происходить неполное сгорание топлива, труба начнет сильно дымить,

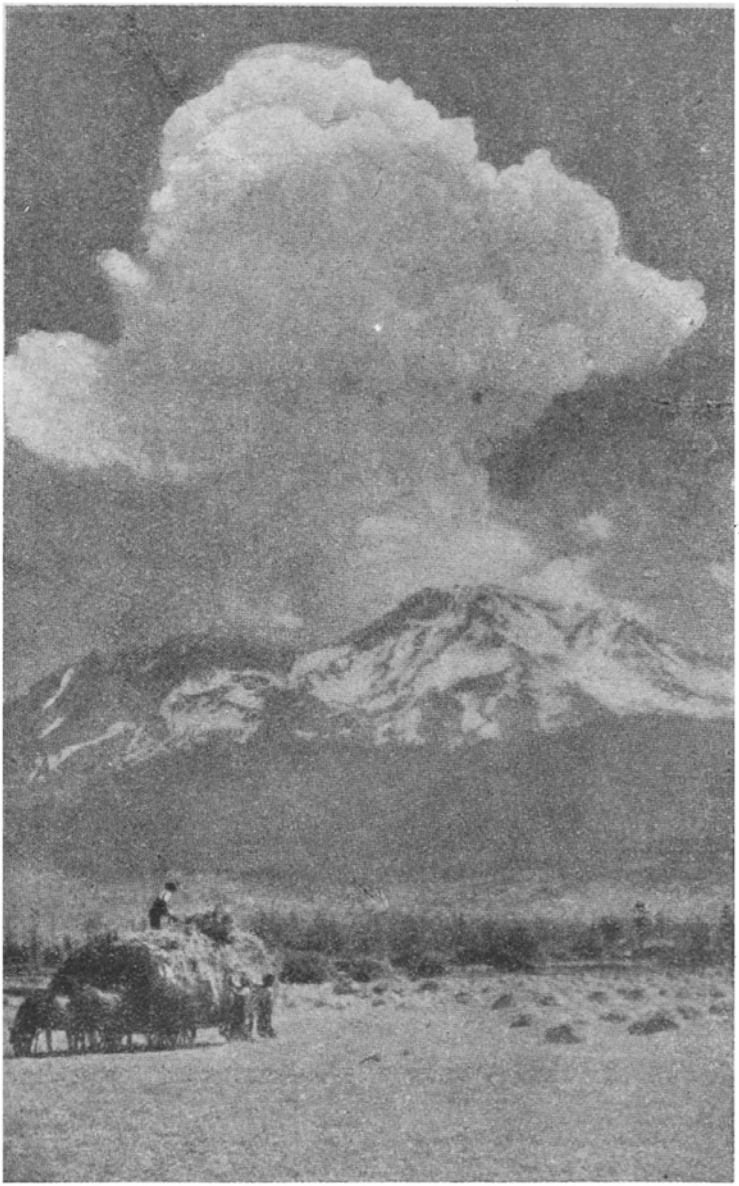


Рис. 99.

вследствие чего, во-первых, портится воздух, насыщается мелкой сажей, засоряющей дыхательные органы человека, и,

во-вторых, продукты неполного сгорания выбрасываются на воздух, а между тем их можно было бы использовать, получив из них тепло. Вот почему в благоустроенных топках производится автоматический анализ воздуха на содержание углекислоты. При нормальной тяге весь кислород воздуха должен быть заменен углекислотой. Если углекислоты будет не хватать—значит тяга больше, чем надо. Если же тяга меньше, чем следует, труба начинает дымить. Поэтому кочегар должен все время следить за прибором, где производится анализ—прибор действует автоматически—и следить за тем, чтобы трубы не дымили, для чего устраивается специальное окно в крыше котельного отделения. Итак, хорошо построенная фабричная топка и труба не должны почти совсем дымить!

ЛЕКЦИЯ ДЕСЯТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Движение атомов и молекул. Кинетическая теория материи. Строение газа. Модель газа по Эйхенвальду. Об'яснение закона Бойля-Мариотта. Диффузия газов. Условие образования облака и тумана. Роль пыли.

На прошлой лекции мы познакомились с целым рядом тепловых явлений, но ни одним словом не обмолвились о том, что же представляет собой тепло? Сегодня мы попытаемся дать ответ на этот вопрос. Современная физика об'ясняет тепло тем, что атомы и молекулы, т. е. те частицы, из которых построено все вещество, находятся в непрерывных движениях. Когда это движение усиливается, мы говорим— тело нагревается, когда движение ослабевает, мы говорим— тело охлаждается. Если частицы, составляющие наше тело, например, нашу руку, движутся в общем медленнее, чем частицы, составляющие тот предмет, которого мы касаемся, мы испытываем ощущение чего-то теплого. Вы видите, что эта физическая теория очень тесно связана с вопросом об атомном строении вещества, и, следовательно, она сближает нас с химией. Только химика интересует другая сторона дела. Химика интересует вопрос, как соединяются между собой атомы различных веществ, образуя сложную частицу— молекулу сложного вещества. Физика интересует состояние движения частиц: увеличение или уменьшение их скорости и самый характер движения. Поэтому та теория физики, которую мы собираемся сегодня с вами разбирать и кото-

рая наряду с строением вещества об'ясняет тепловые явления, как результат движения атомов и молекул, носит название „кинетической теории материи" (от греческого слова „кинема"—движение).

Прежде всего является вопрос, как можно доказать, что частицы, из которых построено все вещество, находятся в состоянии движения? Целый ряд фактов убеждает нас, что движение частиц действительно происходит. Мы уже приводили раз пример, как распространяется запах какого-нибудь летучего, легко испаряющегося вещества. Ведь если мы пролили на стол несколько капель эфира, которые испарились, т. е. перешли в газообразное состояние, и если мы через некоторое время почувствовали запах в отдаленном конце комнаты, то ведь это могло случиться только потому, что частицы пара эфира переместились на всю длину комнаты Это показывает, что частицы в газообразном состоянии очень легко подвижны и могут перемещаться на громадные расстояния. Возьмем другой пример: нальем осторожно чистой дистиллированной воды на слой крепкого раствора медного купороса, находящегося в узком цилиндре. Раствор останется на дне, он тяжелее воды, а над раствором будет находиться чистая вода, но через несколько дней мы заметим, как граница между раствором и водой начнет размываться, толщина слоя окрашенного раствора начнет увеличиваться, и через несколько месяцев вся жидкость в сосуде будет равномерно окрашена. Как могли тяжелые частицы растворенного медного купороса оказаться сами собой наверху сосуда, если они не обладали движением? Может показаться непонятным, однако, почему смешение или распространение растворенного купороса — этот процесс называется диффузией — происходит так медленно? Надо иметь в виду, что частицы медного купороса со всех сторон окружены частицами воды, которые также движутся. Частицам так же трудно выбраться наверх, как человеку протискаться сквозь большую и густую толпу людей.

Даже в твердых телах можно наблюдать перемещения частиц. Так, в кусках свинца, позолоченных с одной стороны и только с поверхности, находили через несколько лет после золочения следы золота на некотором расстоянии от поверхности, где раньше золота не было. Проф. Милликан, один

из наиболее выдающихся сейчас работников в области кинетической теории, в одной из популярных статей дает следующую наглядную картину движений частиц в твердых, жидких и газообразных телах. В газах частицы двигаются примерно так, как комары-толкачи в рое. Отдельный комар может перелетать из одного края роя к другому. В жидкостях движение происходит примерно так, как движутся черви, собранные в клубок. Движение частиц в твердых телах подобно движению зверей в клетках, приставленных друг к другу. Движение каждой частицы, как в нашем примере движение зверей в клетках, ограничено: перемещения

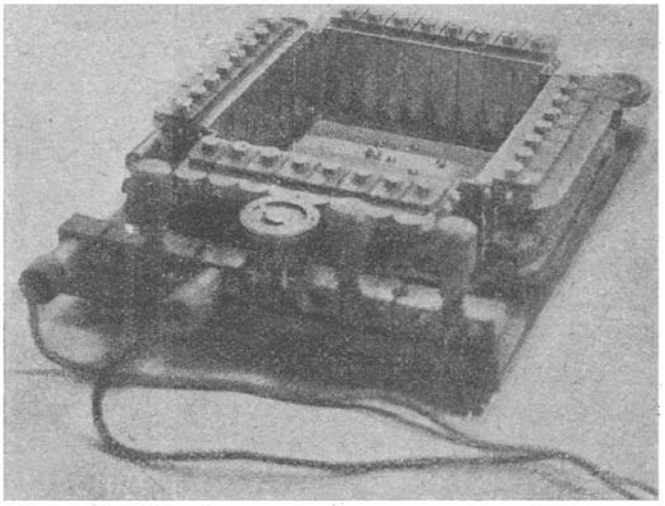


Рис. 100.

на сколько-нибудь значительные расстояния в общем очень редки. Всего проще движение в газах, где частицы действуют друг на друга только во время столкновений. Чтобы нагляднее представить себе движение частиц в газах, мы воспользуемся моделью, построенной по мысли проф. А. А. Эйхенвальда. Модель состоит из четырех гребенок (см. рис. 100 и 101) с железными зубцами, расположенных с четырех сторон квадратного куска зеркального стекла. За гребенками расположены т. н. „электромагниты“ EE (см. рис. 101), т. е. куски мягкого железа, обмотанные изолированной проволокой. Когда по проволокам электромагнитов пропускают

переменный ток, то железо непрерывно перемагничивается. В промежутках между тем, как ток идет по проволоке в том или другом направлении, он на мгновение прекращается, в этот момент и железо размагничивается. Городской ток имеет 50 перемен в секунду, т. е. в течение секунды ток пятьдесят раз идет в одну сторону и пятьдесят раз идет в другую, в промежутках же железо размагничивается. Вследствие этого зубцы гребенок ММ то притягиваются электромагнитом, то притяжение это прекращается — и они под влия-

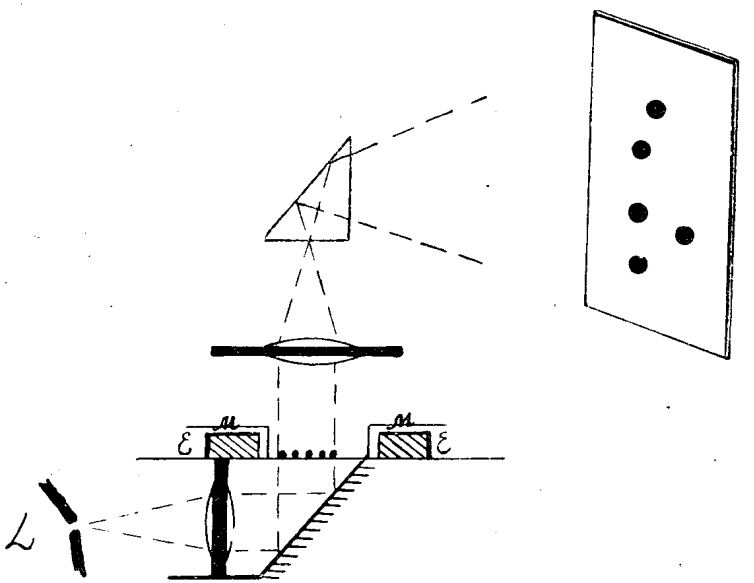


Рис. 101.

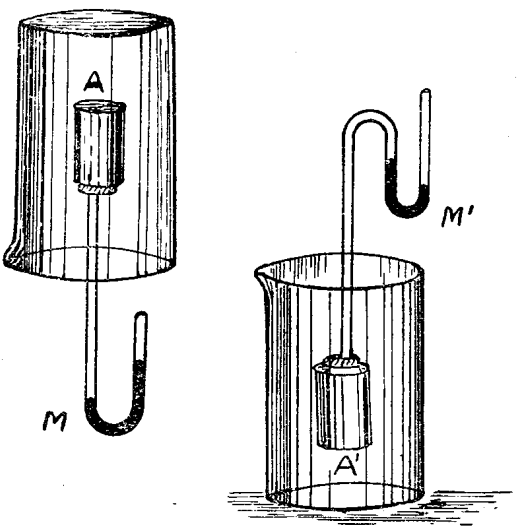
нием упругой силы выпрямляются. Таким образом, под влиянием переменного тока они колеблются, причем,как это видно из чертежа, концы гребенок движутся взад и вперед вдоль зеркального стекла. Размахи колебаний зависят от силы тока в электромагните, поэтому, регулируя силу тока, мы можем изменять величину размахов. Колебания зубцов изображают колебания молекул—частиц, из которых сделан сосуд, заключающий газ. Роль частиц—молекул газа играют велосипедные стальные шарики, которые мы высыпаем на стекло. При помощи зеркала, собирательного стекла, призмы и электрического фонаря (см. рис. 101) мы получаем изображения шариков на стене и можем с удобством сле-

дить за их движениями. Шарик, ударившийся о движущийся зубец, перелетает до другой гребенки, летит обратно, сталкивается по пути с другими шариками и т. д. Словом, у нас получается хаотическое беспорядочное движение шариков по всем направлениям, т. е. мы получаем картину того, что имеет место в газе, согласно представлениям кинетической теории. Если мы усиливаем размах зубцов наших гребенок—ускоряем их движение—мы этим как бы повышаем температуру стенок сосуда, в котором находится газ — на модели стальные шарики от более сильных ударов начинают еще быстрее метаться из стороны в сторону. Наш „газ" нагрелся от стенок—его температура повысилась, так как по кинетической теории—чем больше скорость движения, тем выше температура.

Начнем постепенно ослаблять ток и тем ослаблять размахи зубцов, т. е. будем „охлаждать" сосуд. Вы видите, шарики стали медленно двигаться—вот несколько шариков слиплись вместе. Это произошло потому, что шарики у нас были заранее намагничены, это сделано для того, чтобы подражать молекулярным силам сцепления! Если газ или пар сильно охладить, то мы получаем капли жидкости [1]), вот эти слипшиеся шарики и изображают нам появление жидкости при охлаждении пара. Правда, и в жидкостях частицы находятся в состоянии движения, но этого наша модель выполнить не может. Бросим теперь несколько крупных шариков. Вы видите, что крупные шарики, ударившись о колеблющиеся зубцы гребенок, движутся медленнее, чем маленькие. Один и тот же удар, если он придется по большому шарику, вызывает малую скорость и большую, когда он приходится по маленькому. Энергия же движения, когда все шарики между собой перемешаются, будет в среднем одинакова, как в том, так и в другом случае: меньшая скорость большого шарика компенсируется его большой массой. Вы уже из химии знаете, что молекулы кислорода в 16 раз, а молекулы азота—в 14 раз тяжелее молекул водорода. Следовательно, если *водород находится в сосуде при той же температуре, что и воздух*,—то его частицы должны обладать большей скоростью, чем частицы кислорода и азота, составляющие значительную часть

[1]) О сжижении газов Вы уже знаете из лекций по химии.

воздуха. Правильность этого вывода мы сейчас проверим на опыте. Сосуд из необожженной глины А (см. рис. 102, I), плотно закрытый пробкой, залитой сургучом, сообщается при помощи резиновой трубки с „манометром", т. е. измерителем давления, которым мы уже не раз пользовались. Манометр М состоит из согнутой трубки, в которую налита подкрашенная вода или спирт. Я набираю водород из аппарата Киппа, известного вам по лекциям химии, в большой опрокинутый дном кверху стакан. Водород значительно легче воздуха и потому его надо собирать именно таким образом, чтобы он не улетел наверх. Я надвигаю стакан на пористый глиняный горшок, и Вы видите, как быстро давление внутри горшка возрастает, уровень воды в том колене манометра, который соединен с пористым горшком, падает, а, между тем, давление водорода в открытом стакане такое же, как и у воздуха в пористом сосуде, сквозь поры соединяющегося с атмосферой. Отчего же давление как будто само собой возрастает? Дело в следующем. Когда мы надвинули стакан, мы искусственно создали атмосферу водорода вокруг пористого горшка. Так как молекулы водорода движутся быстрее, чем молекулы кислорода и азота, как мы только что выяснили, то они в бóльшем числе входят в сосуд; менее быстро движущиеся частицы воздуха не поспевают выходить в таком же числе, в каком *успевают* войти частицы водорода. Общее число частиц воздуха и водорода внутри сосуда возрастает, оттого и увеличивается давление на стенки сосуда, и на поверхность жидкости будет производиться большее число ударов, т. е. давление должно



I. II.

Рис. 102.

расти. Я убираю стакан с водородом. Вы видите, что не только восстанавливается прежнее давленне, но оно становится меньше прежнего, стало быть, меньше атмосферного. Почему? По той же причине. Теперь *внутри* сосуда находятся как частицы воздуха, так и более быстро движущиеся частицы водорода—они быстрее успевают выходить и не так быстро замещаются более медленно движущимися частицами наружного воздуха. Повторяем опыт с углекислым газом (см. рис. 102 II): его приходится собирать в открытом сверху сосуде, он тяжелее воздуха. Мы замечаем, что, как и следовало ожидать, при погружении пористого сосуда в стакан с углекислым газом давление в пористом сосуде понижается, но менее резко, чем повышалось давление в атмосфере водорода. Причина этого ясна, частицы углекислоты в среднем только в полтора раза тяжелее частиц воздуха, а частицы водорода в 14 с лишним раз легче, поэтому разница в скоростях в случае водорода во много раз больше, чем в случае углекислого газа. Таким образом, кинетическая теория об'ясняет нам все детали явления диффузии газов через пористые перегородки. Мы только что говорили, что давление газа об'ясняется ударами молекул. Нельзя ли это показать на нашей модели? Ставим на зеркальное стекло легкую алюминиевую перегородку (рис. 103) и помещаем большую часть шариков по одну ее сторону, заставляем зубцы гребенок колебаться; шарики у нас пришли в движение, и Вы видите, как под ударами шариков перегородка начала передвигаться. Здесь мы имеем наглядную картину, об'ясняющую нам давление газа или пара. Если с одной стороны поршня (при равной температуре с обеих сторон) частиц больше, т. е. плотность больше, то и число толчков, даваемых отдельными шариками, будет больше, а, следовательно, давление будет больше, и поршень начнет двигаться. Равенство „температуры" достигается у нас на модели тем, что все зубцы всех гребенок колеблются одинаково; когда мы увеличиваем или уменьшаем размахи колебаний зубцов, то это делается сразу на всех гребенках. Теперь посмотрим, как кинетическая теория позволяет об'яснять количественные соотношения, например, закон Бойля-Мариотта. Представим

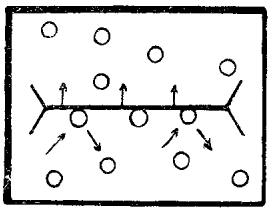


Рис. 103.

себе сосуд в виде куба (рис. 104). Пусть этот сосуд наполнен молекулами—шариками, летящими по всем направлениям и сталкивающимися как друг с другом, так и со стенками; эти удары и составляют то, что мы называем давление газа. Положим, далее, что мы уменьшили об'ем куба так, что каждое из его ребер стало в два раза меньше, не изменяя при этом числа и скорости движущихся внутри него молекул. Об'ем этого нового куба, как это ясно из чертежа, будет в 8 раз меньше прежнего. Посмотрим, как изменится число ударов. Все удары, которые раньше приходились на площадку ABCD, теперь произойдут на вчетверо меньшей площади Abcd, от этого давление должно возрасти в 4 раза, но кроме того *каждая из частиц*, ударяющаяся в площадку Abcd, будет ударяться при измененном об'еме вдвое чаще, так как путь от Abcd к efgh вдвое короче, чем путь от ABCD до EFGH. Поэтому давление должно возрасти еще в два раза. Итак, об'ем уменьшился в 8 раз, давление возросло также в 8 раз. Из основ кинетической теории мы приходим, следовательно, к закону Бойля-Мариотта.

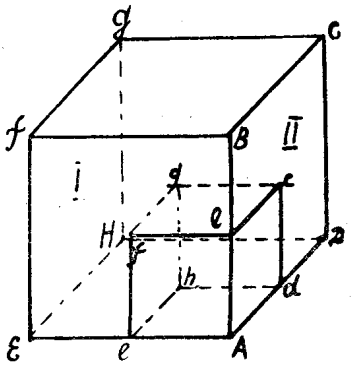


Рис. 104.

Этот вывод, приблизительно даже в такой же форме, как это сейчас сделали мы, был дан еще М. В. Ломоносовым в его замечательном сочинении „Размышления об упругой силе воздуха" (1745 год). Но что особенно замечательно, Ломоносов тогда же показал, что при больших давлениях, когда частицы сильно сближены друг с другом и когда они сильно начинают препятствовать движению друг друга, закон Бойля не может в точности выполняться; мы должны заметить отступления от этого простого соотношения. Эти отступления действительно были впоследствии найдены, а теоретически величина этих отступлений была детально вычислена на основе кинетической теории знаменитым голландским физиком Ван-дер-Ваальсом в семидесятых годах XIX столетия, т. е. через 100 с лишним лет после Ломоносова.

Это очень поучительный пример. Целая философская школа эмпириокритиков, тщетно старающаяся преодолеть материализм в науке, еще очень недавно боролась с кинетической теорией, пользующейся „гипотезой о движениях каких-то гипотетических молекул". По воззрениям этой школы ученый должен устанавливать законы, не пытаясь их *об'яснять,* так как все *об'яснения* в большей или меньшей степени представляют нашу собственную фантазию. Из только что сказанного ясно, что эти „фантазии" не только предсказали факты—отступления от простого закона Бойля-Мариотта, но и показали, почему такие факты должны наблюдаться. Если бы мы ограничились по совету эмпириокритиков „чистым описанием", ограничивались бы простым констатированием факта, выраженного законом Бойля-Мариотта, то отступление от этого закона явилось бы для нас неожиданностью. Мы не были бы в такой мере, как сейчас, знакомы с окружающими нас явлениями.

Рассмотрим теперь еще одно явление, очень важное по своим практическим приложениям. Положим, что в цилиндре под поршнем находится воздух, и мы быстро вдвигаем поршень. Что должно произойти с частицами воздуха, если мы станем на точку зрения кинетической теории? Представим себе, что к нам бросили мячик, и мы навстречу летящему мячику выставили руку; мячик отскакивает, но если мы сильно двинем руку вперед навстречу летящему мячику—мы всегда делаем это, когда хотим отбить мячик—то мяч отскакивает со значительно бо́льшей скоростью, чем от покоящейся руки. Поэтому молекулы газа, ударившиеся о движущийся им навстречу поршень, отскочат от него с большей скоростью. Скорость частиц газа должна увеличиться: вследствие чего температура газа должна повыситься.

Это явление замечал всякий, кому приходилось держать в руках маленький насос для накачивания велосипедных шин; при работе насоса, когда мы сжимаем воздух, которым мы накачиваем шины, цилиндр в нижней своей части, где происходит сжатие, сильно нагревается.

Это явление мы можем продемонстрировать на следующем опыте: в толстостенном стеклянном цилиндре под самым поршнем на крючке мы помещаем кусок взрывчатой пироксилиновой ваты. Быстрым движением руки я опускаю

поршень вместе с ватой, вследствие этого, благодаря сжатию, температура воздуха настолько повышается, что пироксилиновая вата вспыхивает—эта вспышка видна во всей аудитории, благодаря стеклянным стенкам цилиндра. Если мы, наоборот, будем быстро вытягивать поршень, то молекулы, ударяющиеся о движущийся по направлению *от них* поршень, будут отскакивать с сильно уменьшенной скоростью; если мы в момент, когда на нашу ладонь налетает мячик, будем оттягивать руку назад, то мяч отскочит с очень небольшой скоростью. Поэтому при быстром расширении газа происходит охлаждение. Этот процесс происходит в цилиндре паровой машины, а также в двигателе внутреннего сгорания.

Представим себе, что в цилиндр был впущен из котла пар, приподнявший немного поршень, после чего доступ пара из котла был прекращен—была произведена т. н. „отсечка" пара—горячий пар, имеющий значительно большее давление, чем воздух (чем выше температура, тем больше скорость движения частиц, тем сильнее ударяют частицы о поршень). Поршень приходит в движение. Частицы пара, отскакивающие от поршня, будут двигаться с замедленной скоростью: они передадут часть своего движения поршню, а так как их скорость станет меньше, то температура пара понизится: тепло пара перешло в работу при перемещении поршня и связанного с ним механизма паровой машины. Поэтому мы приходим к выводу, что расширяющийся газ или пар, производящий при этом расширении работу, должен охлаждаться. Это можно показать на следующем опыте. Я беру стеклянный шар А с краном (см. рис. 105), ртом накачиваю в него некоторое количество воздуха и закрываю кран. Дадим шару остынуть, так как я его слегка нагрел своим дыханием. Во всяком случае теперь, после накачивания, давление воздуха в шаре немного больше атмосферного давления. Когда шар совершенно остынет, его температура будет равна

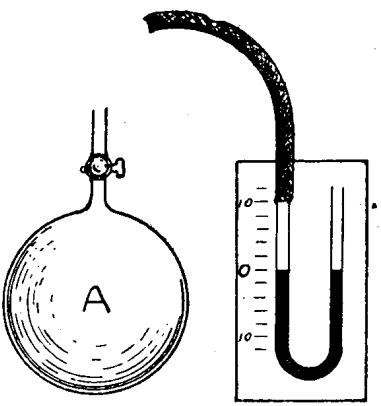


Рис. 105.

температуре комнаты. Я открываю кран: воздух со свистом выходит наружу. Если мы будем держать руку около отверстия, то мы ясно почувствуем движение струи. Раздвигающиеся частицы воздуха внутри шара приводят в движение воздух, окружающий отверстие шара, передавая им свое движение и производя работу; собственное же их движение от этого замедляется: температура воздуха в шаре понизится, а давление сравнивается при открытом кране с давлением атмосферы. Я надеваю теперь на отверстие шара резиновую трубку, другой конец которой соединен с манометром. Вы видите, как давление воздуха в шаре быстро возрастает. Выясним сейчас, почему. Сжатый воздух, имевший температуру комнаты, расширился: его давление сравнялось с давлением атмосферы, при этом он производил работу и охладился ниже температуры комнаты. Постепенно он начинает прогреваться, и так как шар после того, как мы надели резиновую трубку, идущую к манометру, не сообщается больше с атмосферой и воздух из него выходить не может, то давление должно повыситься. Самый факт нагревания газа и связанного с этим нагреванием повышения давления свидетельствует о том, что при расширении и производстве работы газ, находившийся при температуре комнаты, должен был охладиться. Наоборот, если мы разредим воздух, высасывая воздух из шара и закрывая кран, то над разреженным воздухом будет производиться работа при открывании крана. Атмосферный воздух, как только мы откроем кран, со свистом будет входить внутрь стеклянного шара, скорость частиц воздуха внутри шара будет увеличиваться, температура должна повыситься. Мы надеваем опять трубку от манометра на отверстие шара. На этот раз давление воздуха внутри шара уменьшается, воздух остывает, потому что, когда мы открыли кран, произошло сжатие, и он нагрелся. Таким образом, наблюдаемое нами остывание свидетельствует о происшедшем перед тем нагревании. Эти опыты показывают нам процесс перехода тепла в работу—тепло исчезает, газ охлаждается, взамен этого появляется работа. Этот процесс происходит в паровой машине и в двигателе внутреннего сгорания, к этому вопросу мы еще вернемся (см. XII лекцию). Наоборот, когда работа как будто исчезает, как, например, при сжатии газа—появляется

тепло. Кинетическая теория, как мы видим, дает наглядную картину этого процесса. Дело в конце концов сводится к передаче движения от частиц газа к поршню, вследствие чего движение частиц замедляется, температура газа падает, количество тепла уменьшается; или обратно—энергия движения поршня уменьшается, передаваясь отдельным частицам газа, вследствие чего энергия движения этих частиц, летящих по всем направлениям, увеличивается: растет запас тепла газа и наравне с этим растет и его температура.

Рассмотрим еще в качестве последнего примера механизм образования облака. Мы сейчас получим облако в большом сосуде А (см. рис. 106), воспроизводя в нем те же самые условия, какие имеют место в природе при образовании облака. При каких условиях образуется облако? Когда восходящий ток нагретого и влажного воздуха достигает более высоких слоев атмосферы, где давление значительно меньше (так как там все массы воздуха, лежащие между этими слоями и поверхностью земли, не оказывают давления своим весом), этот влажный и теплый воздух сильно расширяется, что, как мы видели, сопровождается сильным охлаждением; температура его сильно понижается и водяной пар выделяется в виде капель. Мы видели на нашей модели с намагниченными шариками, как, по мере уменьшения скорости движения, шарики слипались, что изображало у нас переход в жидкое состояние. Для получения искусственного облака мы воспользуемся следующим приспособлением: на дне большой бутыли А находится влажная скомканная фильтровальная бумага В. В плотно залитой сургучем пробке вставлены две трубки с кранами. Один кран p устанавливает сообщение с атмосферным воздухом, другой q устанавливает сообщение со второй бутылью A^1, из которой с помощью трубки r выкачивается насосом воздух. Воздух в

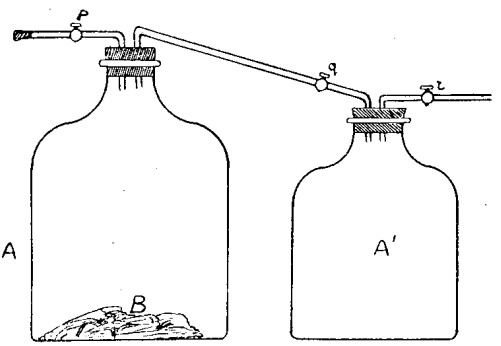


Рис. 106.

бутыли А находится при атмосферном давлении, так как кран р был открыт; он насыщается водяными парами от влажной бумаги. Мы закрываем краны р и q и выкачиваем воздух из A^1. После выкачивания мы открываем кран q, соединяющий бутыли А и A^1. Вы видите, что в сосуде А появляется легкий туман: капельки водяного пара выделяются, но туман получается очень редкий. Произошло это потому, что у нас не было выполнено одно из необходимых условий для образования облака: в атмосфере должно присутствовать некоторое количество пыли. А мы перед лекцией намеренно очистили воздух в бутыли А от пыли; мы сделали это следующим образом. В трубку с краном р была вставлена пробка из ваты. Все краны—р, q и r были открыты. С помощью насоса воздух просасывался через пробку в оба сосуда А и A^1; эта операция проделывалась в течение 15 минут, вследствие чего воздух, находившийся в А и A^1, был заменен воздухом нашей комнаты, причем находившаяся в нем пыль была задержана ватой. Чтобы показать влияние пыли, мы вынимаем пробку из ваты, помещаем вблизи отверстия пламя газовой горелки и просасываем воздух над пламенем. При горении выделяется огромное количество пылинок: отчасти это сажа в мелко раздробленном состоянии; таким образом, мы сейчас создаем искусственно атмосферу с большой примесью пыли. Повторяем теперь опыт с расширением воздуха в бутыли А. Вы видите, что вся бутыль наполнилась густым облаком. Если мы впустим воздух, открыв кран р, то облако сразу рассеивается. Входящий воздух сжимает находившийся в А разреженный воздух, при сжатии выделяется тепло и капельки облака испаряются. Если образовавшееся облако оставить в покое, то через некоторое время оно под действием собственной тяжести осядет на дно бутыли. Это будет происходить очень медленно, так как сопротивление воздуха для таких микроскопических капелек весьма значительно по сравнению с их весом. Если рассмотреть стеклянную пластинку, на которую осело такое облако, в микроскоп, то в капельках можно заметить присутствие пылинок. На этом основан способ английского физика Эйткена подсчитывать число пылинок. Для этой цели отмеренное количество испытуемого воздуха разбавляется большим количеством воздуха, очищенного от пыли; берется проба этой смеси и с ней про-

изводится опыт с получением облака в маленьком сосуде, помещающемся на столике микроскопа. Дно этого сосуда разграфлено на клеточки, так что без труда можно произвести подсчет небольшого числа пылинок, приходящихся на долю одной или нескольких клеточек, и потом уже рассчитать число пылинок на кубический сантиметр испытуемого воздуха. Опыты, сделанные с прибором Эйткена в Англии, дали результаты, помещенные в следующей таблице.

Место наблюдения	Число пылинок на куб. сантиметр воздуха
Дождливая погода (за городом) . . .	32.000
Сухая погода „ . . .	130.000
Комната, освещаемая газовой горелкой	1.860.000
Воздух, собранный над газовой горелкой	30.000.000
На вершине горы Бен-Невис (Шотландия)	335
Индийский океан (вдали от берега)	200

Прибор Эйткена, как Вы видите, дает об'ективную оценку чистоты воздуха, им следует пользоваться для проверки вентиляции фабричных помещений, где по характеру производства бывает много пыли, например, мастерская, где производится полировка металлических изделий. К сожалению, этими приборами еще мало пользуются на практике.

Выясним, чем об'ясняется действие пыли. Представим себе, что две одинаковые капли, т. е. два одинаковых количества воды, выделились—одно на пылинке, другое—в чистом виде. Ясно, что размеры первой капли, осевшей на пылинке, будут больше. Теперь рассмотрим две капли, одну большую А и другую маленькую В (см. рис. 107), и посмотрим, как сильно будут удерживаться частицы воды на поверхности этих капель. Построим для частиц

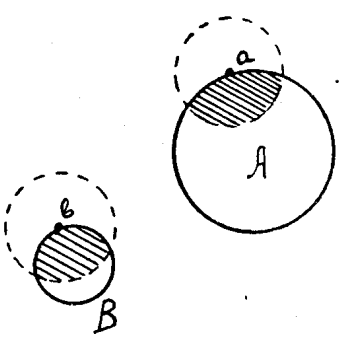


Рис. 107.

a и b шаровые поверхности, построенные радиусом заметного действия (см. VIII лекцию). Мы видим, что в большой капле часть выделенного шара, занятая водой, больше, чем в малой. В малой капле каждая частица воды поверхностного слоя находится как бы больше „на отлете", чем в большой капле. Поэтому частицы воды на поверхности большой капли крепче удерживаются притяжением соседних частиц и не так легко испаряются. Отсюда ясно, что капли, осевшие на пылинках, устойчивее: они не так легко испаряются. Этим и об'ясняется влияние пыли на процесс образования облака. В Америке делались удачные опыты по разбрасыванию пыли с аэропланов—этим способом можно вызвать образование облака во влажном воздухе и ускорить появление дождя. Здесь мы видим уже очень значительный шаг в сторону не одного только „об'яснения" мира, но и его „изменения".

Прибавление.

1) Количественный подсчет скорости диффузии через пористую перегородку и отношения скоростей молекул различной массы производится следующим образом. Кинетическая энергия больших и маленьких шариков на нашей модели после того, как они много раз столкнутся друг с другом и с зубьями гребенок, в среднем устанавливается одинаковая. Кинетическая энергия выражается произведением массы на квадрат скорости, деленным на два (см. дальше настоящее прибавление). Итак, для молекул массы m и M, находящихся при одной и той же температуре, имеем $\frac{mu^2}{2}=\frac{MU^2}{2}$ или $mu^2=MU^2$ ....(a), если u и U средние скорости движения молекул массы m и M. Если мы возьмем газы в равных об'емах и не только при равных температурах, но и при равном давлении, то, как известно из химии, в этих об'емах будет находиться одинаковое число молекул, скажем N; умножим обе части равенства на N, имеем $Nmu^2=NMU^2$ или, так как произведение Nm и NM есть плотности газов d и D (если N есть число частиц в одном кубическом сантиметре), $du^2=DU^2$, откуда $\frac{u^2}{U^2}=\frac{D}{d}$ или $\frac{u}{U}=\sqrt{\frac{D}{d}}$ .....(*в*), средние скорости молекул находятся в обратном отношении корней квадратных из их плотностей. Скорость молекул опре-

деляет скорость диффузии через пористую перегородку. Считая, что воздух в 14,4 (приблизительно) раз тяжелее водорода и ставя вместо $\frac{D}{d}$—14,4 в формулу b, мы находим для отношения средних скоростей молекул водорода и воздуха (смеси кислорода и азота—от других составных частей воздуха мы отвлекаемся) число 3,8. В самом деле, число 3,8, умноженное само на себя, дает число близкое к 14. Таким образом, скорость частиц водорода примерно в 4 раза больше скорости частиц воздуха. Для углекислого газа и воздуха имеем $\frac{D}{d}=1{,}5$ и $\frac{u}{U}=1{,}23$; таким образом, частицы углекислого газа всего только в 1,2 раза движутся медленнее; оттого и давление в пористом сосуде изменялось значительно меньше в опыте с углекислым газом по сравнению с водородом.

2) Что кинетическая энергия измеряется величиной $\frac{mv^2}{2}$, следует из таких соображений: положим, тело массы m и веса mg падает с высоты S. Потенциальная энергия убывает на величину mgS. Если тело падает в безвоздушном пространстве, то оно никуда не передает своей энергии. Энергия остается в нем, она принимает только другую форму—форму кинетической энергии, т. е. энергии движения. Величины этой энергии движения, по закону сохранения энергии, должна равняться той же величине mg.S. Подставим вместо $S=g\frac{t^2}{2}$ т. е. выражение пройденного пути через ускорение и время падения. Имеем $\frac{mg^2t^2}{2}$, но по истечении времени t скорость падающего тела будет $v=gt$, откуда имеем для величины энергии движения упавшего с высоты S тела—$K=\frac{mv^2}{2.}$

ЛЕКЦИЯ ОДИННАДЦАТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Переход из жидкого состояния в парообразное или газообразное. Теория подвижного равновесия. Измерение давлений—манометр. „Скрытое" тепло испарения. Переход из твердого состояния в жидкое и обратно.

Мы познакомились в прошлой беседе с основами кинетической теории материи, принимающей зернистое—атомное строение вещества и об'ясняющей тепло непрерывными движениями атомов и более крупных частиц—молекул, составленных из атомов. Мы видели, что эта теория не представляет собой какого-нибудь отвлеченного фантастического построения: она вся вытекает из фактов и на каждом шагу фактами же проверяется. Сегодня мы рассмотрим процессы перехода вещества из одного „состояния" в другое, т. е. из жидкого в газообразное, из жидкого в твердое, из твердого в газообразное и обратно. При этом руководящей нитью при изучении этих явлений у нас будет все та же кинетическая теория материи.

Каждый из Вас в состоянии привести много примеров перехода вещества из жидкого состояния в твердое, например, замерзание льда, затвердевание воска или парафина, затвердевание расплавленного свинца и других металлов. Точно также мы очень часто встречаемся с переходом жидкости в газообразное и парообразное состояние: испарение воды, спирта, эфира и других более или менее летучих жидкостей. Кроме того, мы знаем, что твердые вещества, как, например, лед, непосредственно переходят в пар. Замерзшее мокрое

белье „сохнет“ на морозе. Точно также даже такой тугоплавный металл, как вольфрам, из которого делаются волоски в „экономических“ лампах накаливания, испаряется при высокой температуре накала. У лампочек, долго бывших в употреблении, внутренняя поверхность стеклянного колпачка бывает всегда покрыта темным налетом—это осевший пар металла вольфрама.

Мы займемся сейчас изучением процесса испарения при самых простых условиях. Заставим жидкости испаряться в т. н. торичеллиеву пустоту. Для этого мы берем 4 трубки, наполняем первую из них доверху ртутью. Эта трубка у нас будет служить барометром, и с ней мы будем сравнивать остальные трубки. В трех других трубках (рис. 108) мы

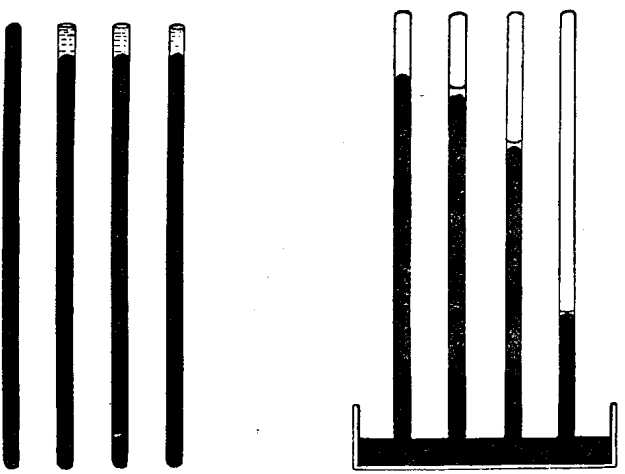


Рис. 108.

оставляем свободное место, куда помещаем по несколько капель воды, спирта и эфира. Опрокидываем все 4 трубки над плоской ванночкой со ртутью. Ртуть в барометрической трубке стоит всего выше; во второй—уровень миллиметров на 12 ниже, и над ртутью видна капелька воды. В третьей с каплей спирта—уровень еще ниже и, наконец, в четвертой с эфиром ртуть опустилась почти на половину по сравнению с барометрической трубкой. Отчего опустилась ртуть? Вес нескольких капель жидкостей, во много раз более легких, чем ртуть, не может понизить уровня ртути заметным образом. Ясно, что понижение уровня вызвано давлением пара

жидкостей, испарявшихся в разреженное пространство [1]) „торичеллиевой пустоты". Мы должны себе представлять, согласно кинетической теории, пар над каплей жидкости, как собрание частиц, летающих по всем направлениям на подобие шариков на той модели, которой мы занимались прошлый раз. Ударами этих частиц о поверхность жидкости и об'ясняется самый факт давления. Давление определяется числом ударов и силой каждого удара. Сила каждого удара возрастает с увеличением скорости движения частиц, следовательно, с возрастанием температуры. Я нагреваю трубочку с каплей спирта и эфира осторожно газовой горелкой, и Вы видите, как уровни быстро понижаются; нагреванием я ускоряю процесс испарения, увеличиваю число частиц пара и, следовательно, число ударов, а, кроме того, при более высокой температуре каждый удар оказывает более сильное действие вследствие увеличившейся скорости движения частиц. Но почему же испарение жидкостей не одинаково при одной и той же температуре; почему давление пара эфира значительно больше давления пара воды? Вспомним опыт с поверхностным натяжением: мы видели, что поверхностная пленка воды прочнее пленки эфира—пленка воды на сетке поплавка удерживала поплавок под водой; несколько капель эфира, вылитых на поверхность воды, заставляли поплавок всплывать; пленка раствора эфира в воде уже не выдерживала—она разрывалась под напором погруженного в воду поплавка. А на что это указывает? Прочность пленки зависит от сил сцепления частиц жидкости: в эфире это сцепление значительно меньше, чем в воде, поэтому движущимся частицам эфира в жидкости легче преодолеть взаимное притяжение и оторваться от капли; эфир, ведь, как мы знаем, очень быстро испаряется. Установим теперь линейку горизонтально по уровню и поместим ее на высоте уровня ртути в трубке, где над ртутью находится капля воды. Будем нагибать трубку, двигая ее вдоль линейки: Вы видите (рис. 109), что ртуть входит в трубку, уменьшая об'ем, предоставленный пару, но уровень ртути все время стоит на высоте линейки,

[1]) В „торичеллиевой пустоте" находятся следы воздуха и ртутный пар в очень небольшом количестве: ртутный пар может понизить уровень ртути при комнатной температуре, как показывают опыты, в детали которых мы не можем сейчас входить, приблизительно на одну тысячную долю миллиметра.

т. е. он остается все время на той же высоте над уровнем ртути в сосуде, в который погружен конец трубки. Это показывает, что давление паров воды остается без изменения, несмотря на уменьшение об'ема пара, вопреки закону Бойля-Мариотта! Как об'яснить это противоречие? По мере уменьшения об'ема, предоставленного пару, число частиц пара, приходящееся на каждый кубический сантиметр, возрастает, поэтому и число ударов о стенки и о поверхность воды также возрастает. При ударе о поверхность воды частица пара задерживается водой, капля воды увеличивается, а общее число частиц пара, находящихся над жидкостью, уменьшается, это происходит до тех пор, пока количество переходящих в жидкое состояние частиц пара не сравняется с числом частиц, выходящих из жидкости вследствие испарения. Тогда у нас устанавливается т. н. „подвижное равновесие", „приход" частиц пара уравнивается с „расходом", т. е. с числом молекул, переходящих обратно в жидкое состояние. Это равновесие будет сохраняться до тех пор, пока в каждом кубическом сантиметре пара будет определенное число молекул, соответствующее испарению при данной температуре жидкости. Когда равновесие нарушается, например, при повышении температуры, число испаряющихся частиц превосходит число возвращающихся обратно: приход пара превосходит наличный расход, остается избыток; число молекул, поступающих в каждый кубический сантиметр, возрастает, вследствие этого увеличивается число ударов о стенки сосуда, занятого паром, в том числе и о поверхность жидкости, тогда и „расход" начинает постепенно увеличиваться и будет увеличиваться, благодаря увеличению испарения, до тех пор, пока новый „расход" не сравняется с увеличившимся

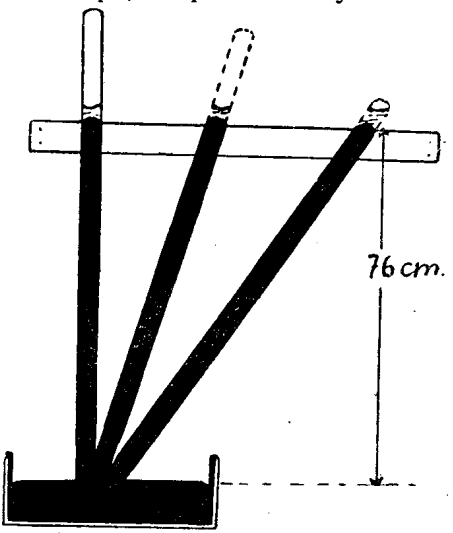


Рис. 109.

„приходом"; тогда устанавливается подвижное равновесие „на новой основе", т. е. при увеличившемся испарении и при увеличившемся содержании молекул пара, приходящихся на каждый кубический сантиметр об'ема пара. Но почему при каждой данной температуре число молекул, испаряющихся с определенной поверхности определенной жидкости, бывает одно и то же?

Для этого вспомним опыты со стальными шариками. Когда шарики летали по всем направлениям и в полном беспорядке сталкивались друг с другом и с колеблющимися зубцами гребенок, то далеко не все шарики двигались с одинаковой скоростью. Один и тот же шарик, то ударившийся о зубец, который, подтолкнув его, сообщил ему добавочную скорость, то столкнувшийся с летящим навстречу ему другим шариком, будет иметь в разные моменты своего движения различную скорость. Мы можем говорить, таким образом, только о средней скорости движения маленьких шариков, отличающейся от скорости шаров с большой массой. Итак, при одной и той же „температуре", т. е. при одном и том же состоянии движения зубцов гребенки, шарики одинаковой массы только в среднем имеют одинаковую скорость: при данной средней скорости всегда будет некоторый процент частиц, движущихся со скоростями, превышающими эту среднюю, нам известную, величину. Далее, для того, чтобы вырваться из сферы притяжения частиц жидкости, расположенных вблизи поверхности, данная частица должна обладать вполне определенной скоростью, сообщающей ей определенную энергию движения, достаточную для преодоления сил притяжения соседних частиц. Ясно, что, чем ниже будет температура и чем, следовательно, меньше будет средняя скорость движения по сравнению со скоростью, при которой частица может оторваться от всей массы жидкости, тем реже будут отрываться частицы, потому что случаев, когда при данной средней скорости у какой-либо частицы скорость окажется значительно больше этой средней величины, будет не так много. Подобно тому, как, идя по улице в большом городе, мало вероятия встретить сразу большое число людей очень высокого роста, значительно превосходящего средний рост взрослого человека. При более же высокой температуре, когда средняя скорость будет больше, но остается все же меньше той скорости, при которой частицы

могут оторваться, число частиц, имеющих эту необходимую для отрыва скорость, будет значительно больше. Точно так же, как, идя по улице, мы наверное встретим значительное число людей рост которых хотя и немного, но все-таки выше среднего. Таким образом, при каждой температуре имеется свое определенное число частиц, которые отрываются с поверхности. Мы до сих пор говорили о том, как происходит испарение „в торичеллиевой пустоте", но ведь жидкости испаряются в атмосферном воздухе при нормальном атмосферном давлении. В чем же разница? Дело сводится к тому, что процесс испарения в воздухе идет медленнее. Частицы пара сталкиваются с частицами воздуха, отлетают назад и снова задерживаются жидкостью, и только немногим из них удастся проскользнуть между первыми рядами толкущихся около поверхности жидкости молекул воздуха и смешаться с ними. Если испарение происходит в закрытом сосуде, то все равно подвижное равновесие наступит, когда из глубины смеси на поверхность будет возвращаться столько же частиц, сколько их выделяется на поверхности, только это равновесие устанавливается гораздо медленнее. Эти соображения блестящим образом оправдались при постройке новых, т. н. „полуваттных" [1]) ламп, т. е. ламп, берущих по полуватта на 1 свечу. В самом деле, чем выше температура накаленной проволоки, тем больше света она дает, но и тем быстрее испаряется металл, лампочка покрывается изнутри темным налетом, и, в конце концов, проволочка разрывается. Из лампочки воздух выкачан, так что процесс испарения идет беспрепятственно. Если лампочку наполнить химически чистым азотом без малейших примесей кислорода, то окисления проволоки—ее сгорания—происходить не будет. Присутствие же молекул азота задержит процесс испарения: выделившиеся с проволоки частицы металла сплошь и рядом будут отскакивать от молекул азота и возвращаться обратно в проволоку; проволока будет медленнее испаряться—число часов горения лампы увеличится, и вместе с тем проволоку можно сильнее накаливать и получать от лампы больше света. Таким образом, кинетическая теория материи не только об'ясняет нам окружающие нас явления, но и дает ценные указания, в каком направлении надо совершенствовать технику.

[1]) Уатт—тысячная доля килоуатта (см. лекция II).

Мы уже видели, если нагревать барометрическую трубку, содержащую каплю жидкости и *насыщенные пары* этой жидкости,—пар, находящийся в соприкосновении и в подвижном равновесии с жидкостью, из которой он выделяется, называется насыщенным, — то упругость пара все более и более повышается, — столб ртути опускается. Наконец, упругость пара станет равной атмосферному давлению, когда уровень ртути в трубке опустится до уровня ртути в широком сосуде, в который были погружены все наши 4 торичеллиевы трубки. Та температура, при которой это случится, будет температурой кипения данной жидкости. Для винного спирта это будет 78,3° С, для эфира — 34,9°С и для воды — 100°. Следующее простое рассуждение покажет нам, что при температуре кипения жидкость может испаряться не только с поверхности, но и во всей массе. Представим себе пузырек газа, выделившийся в воде (в воде и других жидкостях газы растворяются; чтобы их удалить, надо сильно разогревать жидкость, тогда растворенные газы выделяются в виде пузырьков). Может ли в этот пузырек выделяться пар? Он может выделиться только тогда, когда внешнее давление, т. е. давление атмосферы плюс давление столба жидкости, находящегося над пузырьком, будет как раз равно или меньше упругости насыщенного пара данной жидкости при данной температуре. Тогда упругость пара преодолевает это внешнее давление: пузырь растет и наполняется паром. Из сказанного ясно, что для процесса кипения, т. е. для выделения пара во всей жидкости, необходимо присутствие пузырьков воздуха — если продолжительным кипячением выгнать из воды воздух, то она при повторном нагревании долго не закипает: она нагревается выше 100°, пока рано или поздно не появится маленький пузырек оставшегося еще в растворе газа, тогда в этот пузырек происходит очень быстрое испарение, пузырек сразу растет до громадных размеров и одним толчком выбрасывает кипящую воду. Кипение происходит в этом случае неровно—толчками, причем часть кипящей жидкости выбрасывается; чтобы избавиться от этого, надо позаботиться о том, чтобы всегда на лицо были пузырьки воздуха: надо предварительно хорошо взболтать воду или всыпать какой-либо порошок, с которым вместе вводятся и пузырьки воз-

духа. Покажем сейчас, какую роль оказывает внешнее давление на процесс кипения. Я беру колбу, в которой кипит вода, и отставляю ее с огня,—кипение прекращается. Я надеваю трубку насоса на стеклянную трубку, плотно вставленную в пробке колбы, и осторожно выкачиваю воздух. Вы видите—кипение возобновляется. Мы уменьшили внешнее давление, поэтому упругость пара, соответствующая более низкому давлению, оказалась уже достаточной, чтобы преодолеть внешнее пониженное давление и раздувать паром пузыри, находящиеся в горячей воде. Этот опыт можно произвести еще в другой, более занятной, форме. Я плотно закрываю пробкой колбу, в которой кипение уже прекратилось, обертываю горло колбы тряпкой и опрокидываю ее дном вверх. Теперь я начинаю дно колбы поливать холодной водой, и Вы видите—кипение от обливания холодной водой возобновилось. Когда вода в колбе кипела, то выделяющиеся пары вытеснили воздух, следовательно, над горячей водой у нас были пары воды. При охлаждении дна опрокинутой колбы на нем начали выделяться эти пары в виде капель—поэтому в колбе оказалось разреженное пространство—внешнее давление на горячую воду уменьшилось, и кипение возобновилось. Отсюда ясно, что в высоких слоях атмосферы, на высоких горах, кипение воды должно начинаться при более низкой температуре. Так, например, на Монблане в Швейцарии вода кипит при значительно более низкой температуре, и в кипятке поэтому нельзя заварить чай—он при этой низкой температуре, как следует, не настаивается. Если мы теперь наденем трубку насоса на стеклянную трубку, вставленную в колбу, где кипит вода, и начнем, не убирая огня, накачивать воздух насосом—это надо делать с большой осторожностью, так как колба с кипящей водой может лопнуть—мы видим, что кипение прекращается. Упругости паров при 100°С не хватает для того, чтобы преодолеть внешнее давление, превосходящее давление атмосферы. При повышенном давлении вода будет кипеть при более высокой температуре, и давление пара будет выше. Котел, в котором кипит вода при повышенном давлении, должен быть весьма прочным. Для измерения давления пара в котле строят специальные измерители давления, или манометры. Манометр устраивается из металлической согнутой трубки А,

которая сообщается с котлом. Сечение этой трубки *a* изображено на рис. 110 рядом с А. Когда давление повышается, трубка изгибается и занимает положение, изображенное на рис. пунктиром, конец трубки А рычажками присоединен к стрелке, указывающей величину давления. В некоторых случаях, чтобы знать, до какого значения поднималось давление, стрелка В толкает перед собой другую С, которая вращается вокруг оси с некоторым трением. Стрелка В толкает ее только в одну сторону — именно в сторону повышающегося давления. При движении в обратную сторону, стрелка В отходитот стрелки С, оставляя ее стоять на месте. По положению стрелки С можно сказать, выше какой величины давление не поднималось, и проверить, насколько внимательно машинист следил за давлением пара в котле, не допуская его выше определенной величины. Машинисты эту стрелку называют часто „кляузницей". Чтобы определить, скольким атмосферам соответствует каждое деление манометра, его сравнивают с ртутным. Ртутный же открытый манометр состоит из длинной трубки, сообщающейся через шарик В (рис. 111), заполненный ртутью, с тем же котлом, с которым сообщается манометр. По мере увеличения давления ртуть из шарика вытесняется в вертикальную трубку. Давление пара уравновешивается, как давлением атмосферы — сквозь открытое колено трубки, так и столбом ртути в этом колене С, отмеренным от уровня ртути в шарике В. Таким образом, давление пара можно измерять в миллиметрах ртутного столба, в атмосферах или в килограммах на квад-

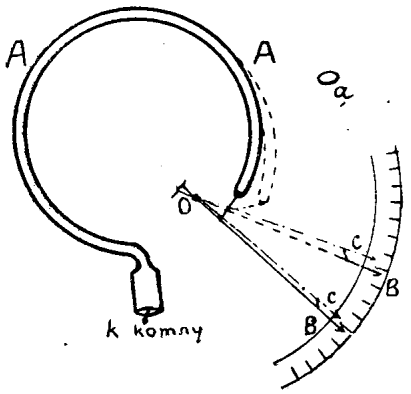


Рис. 110.

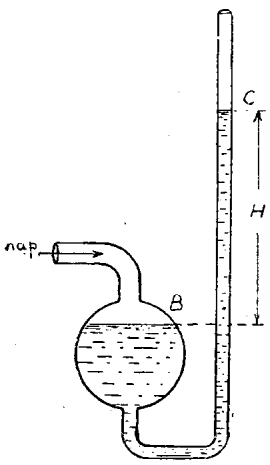


Рис. 111.

ратный сантиметр и определить, таким образом, „цену“ делений в вышеописанном манометре с металлической трубкой [1]).

Мы видим, что кипение начинается при вполне определенной температуре, зависящей от свойств жидкости и величины внешнего давления. Когда мы нагреваем жидкость, температура ее растет непрерывно, но при некоторой вполне определенной температуре внезапно скачком начинается новый процесс—начинается кипение: жидкость, испарявшаяся до тех пор с поверхности, начинает испаряться во всей массе внутри самой жидкости, с образованием пузырей пара. Мы имеем яркий пример диалектического процесса. „Непрерывное развитие привело к скачку“, но этот пример неправильно изложен у Энгельса в его „Антидюринге“: у Энгельса сказано, что жидкость начинает испаряться при температуре кипения, надо добавить—не только с поверхности, а в самой массе ее, так как с поверхности жидкость испаряется при всякой температуре в количествах, возрастающих с температурой, даже лед, как мы видели, испаряется! То же ошибочное изложение процесса кипения находим мы и у тов Н. И. Бухарина в его историческом материализме. Таким образом, пример хотя и выбран удачно, но неправильно изложен. Скачок указан не там, где он в действительности происходит.

Отличительная особенность процесса кипения состоит в том, что температура все время кипения остается неизменной. Отчего это происходит? Кинетическая теория и здесь дает нам ответ. Какие частицы отрываются всего легче с поверхности жидкости, переходя в парообразное состояние?—Наиболее быстро движущиеся, так как только они в состоянии преодолеть притяжение соседних частиц—преодолеть силы сцепления в жидкости. Таким образом, в процессе испарения жидкость лишается наиболее быстро движущихся

[1]) Если измеряемое давление очень высоко, то можно использовать т. н. закрытый манометр, заключающий в себе определенный об'ем воздуха При увеличении давления об'ем уменьшается по закону Бойля-Мариотта, таким образом, по об'ему воздуха можно судить о давлении. Способ этот представляет то неудобство, что изменения об'ема по мере повышения давления становятся все меньше и меньше: так, если при повышении давления вдвое об'ем уменьшился вдвое, то при вторичном увеличении давления вдвое, уменьшается вдвое уже уменьшенный вдвое об'ем, таким образом, это второе изменение об'ема, по сравнению с первым, будет вдвое меньше.

частиц, вследствие чего средняя скорость движения ее частиц становится меньше, жидкость охлаждается. Но есть еще и другая причина; пока испаряющиеся частицы были еще на поверхности жидкой массы, все они двигались, не удаляясь сильно друг от друга. Когда же часть их, сорвавшись с поверхности, начала удаляться, то ей при этом приходилось преодолевать силы сцепления—производить работу за счет имеющегося запаса энергии движения—кинетической энергии. Кинетическая энергия должна убывать—скорость движения уменьшается, и, следовательно, температура должна упасть еще больше.

Так, напр., когда мы бросаем мяч по отвесной линии вверх—он удаляется от притягивающей его земли—скорость его убывает. Разница в этом случае только та, что силы сцепления очень быстро убывают с расстоянием и на очень малом расстоянии уже совсем незаметны, тогда как мяч все время остается под действием силы тяжести [1]). Кроме того, притяжение улетающих молекул жидкости замедляет также и движение тех частиц, которые остались в жидкости. Таким образом, на всякое испарение требуется тепло: при кипении, когда испарение особенно сильно, когда жидкость испаряется, во всей массе наступает равновесие между приходом тепла и расходом, отчего температура и остается постоянной. Что при всяком испарении получается сильное охлаждение—это мы знаем по опыту, мы знаем, как бывает холодно, если в мокрой одежде идти на открытом месте в ветреный день. Роль ветра сводится к тому, что он сгоняет оболочку водяного пара, окружающую влажную поверхность и задерживающую испарение, так как из этой оболочки испарившиеся молекулы частью возвращаются обратно в жидкость. Таким образом, меньшее число частиц пара возвращается обратно в жидкость, и, следовательно, большее количество ее переходит в пар. Это явление можно показать на следующем опыте: плотно закрытая пробкой колба A (рис. 112) при посредстве трубки, вставленной в пробку, соеди-

[1]) Как мы видели, земля притягивает так, как будто бы вся ее масса была сосредоточена в центре земного шара. Радиус земного шара, или расстояние от центра до поверхности—6.370 километров: если к этому расстоянию мы добавим несколько метров, на которые поднимается мяч, то расстояние от мяча до центра земли изменится очень мало. Эти несколько метров составляют ничтожную долю всего расстояния в 6370 километров и потому притяжение остается приблизительно постоянным.

няется с манометром; мы обливаем колбу быстро испаряющимся эфиром. Вы видите, как подкрашенная вода в манометре как бы всасывается колбой. Колба охладилась, сжимающийся воздух оказывает уменьшенное давление по сравнению с атмосферным давлением—это и вызвало изменение уровня в манометре. Я начинаю теперь дуть ртом на поверхность колбы — испарение ускоряется и температура еще более понижается, что мы видим по изменению уровней жидкостей в манометре.

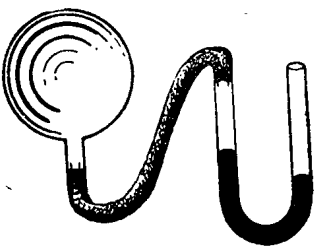


Рис. 112.

Когда, обратно, пар сгущается в жидкость, то силы сцепления ускоряют встречное движение молекул, и собравшиеся в густую толпу частицы жидкости будут двигаться быстрее, при осаждении пара выделяется т. н. „скрытое тепло", которое „скрылось"—было затрачено на работу преодоления сил сцепления при испарении. В лаборатории Вы познакомитесь с тем, как измеряют скрытое тепло парообразования—эта величина достигает для воды большего значения 537 мал. калорий на 1 грамм. Это надо понимать так: если мы имеем грамм воды, достигший температуры кипения, т. е. 100°С, то, чтобы его перевести в пар, надо еще сверх того затратить 537 мал. калорий.

При паровом отоплении, когда пущенный по трубам пар начинает от охлаждения сгущаться в воду, на каждый грамм образовавшейся из пара воды выделяется 537 малых калорий. В этом и достоинства и недостатки парового отопления; с одной стороны, при помощи пара мы можем передавать громадные количества тепла, с другой—это тепло выделяется очень быстро и вызывает резкие колебания температуры, что вредно отражается на здоровье, вследствие чего паровое отопление не рекомендуется врачами. В этом отношении значительное преимущество имеет „водяное" отопление—отопление горячей водой (см. лекцию IX). Испарение и оседание пара в сильной степени умеряют резкие изменения температуры в природе. Весной, когда становится все жарче и жарче, начинается обильное испарение, связанное с сильным поглощением тепла. Наоборот, холода вызывают осадки,

дождь а при этом „скрытое“ тепло испарения выделяется, и температура повышается. Мы здесь опять имеем наглядный пример диалектики процессов природы. Повышение температуры вызывает процесс, который понижает температуру, и, наоборот, понижение температуры вызывает процесс, повышающий ее.

Мы рассмотрели довольно подробно процессы перехода из жидкого в газообразное или парообразное состояние [1]).

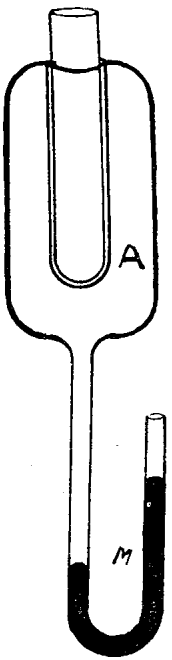


Рис. 113.

Нам остается сказать несколько слов о переходе твердого состояния в жидкое и обратно. Законы этого явления вполне сходны с только что рассмотренными. Поэтому мы ограничимся немногими примерами; переход из твердого в жидкое состояние, плавление или таяние характеризуется также поглощением тепла. Скрытое тепло таяния льда составляет 80 малых калорий на 1 грамм льда. Ясно, что вследствие этого процессы таяния и замерзания оказывают сходное с испарением и осаждением пара влияние на климат. Выделение тепла при затвердевании очень удобно показать на расплавленных кристаллах серноватисто - кислого натра (химич. форм. $Na_2S_2O_3$)—вещества, употребляющегося в фотографической технике. Его легко расплавить в пробирке на небольшом огне и переохладить, т. е. охладить ниже температуры затвердевания. Тогда оно находится в очень неустойчивом состоянии: стоит бросить в него небольшой кристаллик, как сейчас же вся масса затвердевает. Мы опускаем пробирку с переохлажденным веществом в сосуд A с двойными стенками (см. рис. 113), сообщающийся с манометром M, и бросаем кристаллик в пробирку. Так как затвердевание происходит очень быстро, то и „скрытое“ тепло выделяется в

[1]) Различие между паром и газом чисто относительное. Если газообразное вещество близко к состоянию сжижения—мы его называем паром, если оно требует для сжижения сильного охлаждения искусственными средствами и применения сильного давления, то мы называем это вещество газом. О сжижении газов см. Я. Пржеборовский „Введение в химию“, глава VIII, стр. 114.

очень короткий промежуток времени, вызывая заметное нагревание воздуха в сосуде А и перемещение уровней манометра. Выделение тепла при отвердевании вполне понятно в тех случаях, когда об'ем затвердевшего тела меньше об'ема жидкости—тогда при отвердевании частицы сближаются, силы сцепления производят работу, которая идет на увеличение кинетической энергии частиц: скорость молекулярных движений, определяющих температуру, возрастает.

Но как об'яснить явление поглощения тепла при таянии льда? Лед занимает бо́льший об'ем, чем равное по весу количество воды. При затвердении частицы не только не сближаются, но как будто даже раздвигаются. Много лет тому назад английский физик Тиндаль предложил следующее об'яснение: при замерзании частицы воды собираются в группы, при чем эти группы неплотно прилегают друг к другу, образуя промежутки. Таким образом, благодаря этим промежуткам, об'ем льда больше, чем об'ем воды, тогда как в каждой группе частицы лежат ближе друг к другу, чем в жидкости. Исследования последних лет, позволившие с помощью лучей Рентгена определить расположение атомов в твердых телах, вполне подтвердили эту мысль Тиндаля [1]). Остановимся еще на одном явлении, имеющем практическое значение. Всем известно, что если смешать лед или снег с обыкновенной поваренной солью, то лед и снег быстро тают, но за то смесь сильно охлаждается, чем пользуются, между прочим, для приготовления мороженого. Это об'ясняется тем, что соль в местах соприкосновения со льдом растворяется во льду или в снегу; а соленая вода, как известно, замерзает при гораздо более низкой температуре, так что, смешивая соль с толченым льдом или снегом, мы получаем как бы твердый замерзший соляной раствор, который при этих условиях не может существовать в твердом виде: начинается

[1]) Вода представляет много особенностей в сравнении с другими телами, так, например, при нагревании от 0^0 до 4^0 С она не только не расширяется, но, хотя и очень слабо, сжимается и достигает наибольшей плотности при 4^0 С, после чего она начинает правильно расширяться по мере возрастания температуры. Это обстоятельство также в сильной степени влияет на климат; благодаря тому, что вода при 4^0 имеет большую плотность, чем при 0^0, на дне прудов и рек вода никогда не промерзает. Ледяная же кора, обладая малой теплопроводностью, предохраняет воду в глубине рек, прудов и озер от дальнейшего охлаждения.

быстрое таяние, а это, как мы знаем, требует 80 мал. калорий на 1 грамм. Если притока тепла извне нет, то тепло черпается из самой смеси, и она сильно охлаждается. При условии хорошего перемешивания снега с солью можно получить температуру до 21^0 мороза! Смесь твердой углекислоты (замороженный углекислый газ) с эфиром дает около 50^0 мороза.

ЛЕКЦИЯ ДВЕНАДЦАТАЯ.

СОДЕРЖАНИЕ.

Коэффициент полезного действия паровой машины. Превращения тепла в работу. Условный характер этого превращения. Нагреватель и холодильник. Рассеяние энергии—„тепловая смерть". Об'яснение рассеяния энергии с точки зрения кинетической теории материи. Работы Больтцманна. Возникновение, развитие и гибель миров.

Сегодняшнюю беседу мы посвятим изучению закона рассеяния энергии, играющего в современной физике громадную роль—роль, едва уступающую закону сохранения энергии. Из этого закона делались и сейчас делаются выводы, имеющие глубокое философское значение. Поэтому нам придется, как следует, выяснить как самый смысл этого закона, так и проследить, насколько основательны те философские выводы, которые из него делаются. Как и громадное большинство научных теоретических построений, корни этого учения уходят в область практических потребностей, но едва ли найдется в физике какая-либо область теории, где бы теория так тесно переплеталась с запросами жизни, как это имеет место в данном случае. Все учение о рассеянии энергии выросло на почве решения узко-практической задачи: как построить паровую машину, которая давала бы наибольший „коэффициент полезного действия", т. е. машину, которая при той же затрате тепла давала бы наибольшее количество полезной механической работы. Прежде всего рассмотрим, как определить количество тепла, которое можно получить, переводя в тепло известное число единиц работы, и, наоборот, как найти число единиц работы, которое можно

получить, затрачивая одну калорию. Эту задачу можно решить многими способами—мы рассмотрим способ Джауля, интересный тем, что им впервые было *на опыте* установлено соотношение между работой и теплом—был установлен т. н. „механический эквивалент" тепла. Прибор Джауля состоял из калориметра B (см. рис. 114), наполнявшегося водой или ртутью. В этом калориметре вращалась вертикальная ось Ad с большим числом лопаточек a, a, (см. рис. 115) которые проходили сквозь отверстия в перегородках b, b ...., вставленных в калориметр. Перегородки сделаны для того, чтобы лопатки не вызывали кругового движения жидкости в калориметре и в бóльшей степени ее взбалтывали: движение, вызванное между перегородками, затихает, благодаря трению, и превращается в тепло, чего собственно мы и добиваемся. Ось A приводится в движение грузами F и E, при помощи веревок, намотанных на цилиндр A. Грузы, опускаясь на известную высоту h, производят работу A = (E+F) h, которая частью превращается в тепло, благодаря трению, частью же превращается в кинетическую энергию грузов. Так как и эта часть энергии превращается в тепло при остановке грузов, когда эти грузы опустятся, но это тепло не учитывается калориметром, то эту часть энергии надо вычесть из величины работы A=(F+E) h=2Fh, так как F=E. Эта поправка определяется на специальном опыте, в детали которого мы не можем здесь входить. Количество

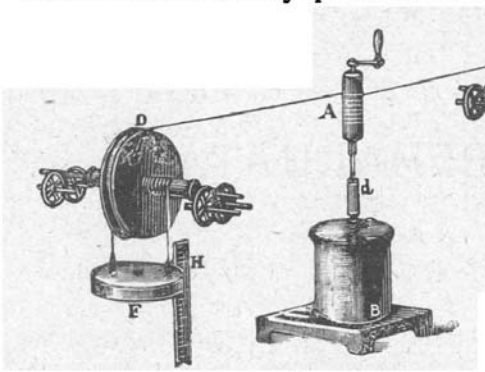


Рис. 114.

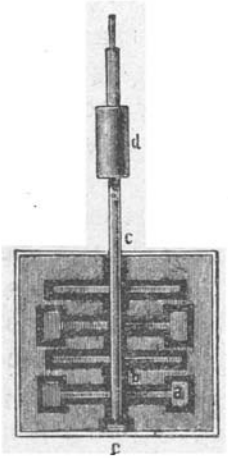


Рис. 115.

тепла, получившееся при трении в калориметре, определяется по изменению температуры, определяемой термометром, и по количеству жидкости и ее теплоемкости (удельной теплоте). Тщательно выполненные опыты показали, что для получения одной большой калории требуется затратить 427 килограмм-метров работы. Это число 427 и есть то, что называется механическим эквивалентом тепла. Это число позволяет нам выражать количество энергии в той или другой мере в килограмм-метрах или калориях. Если, например, мне известно, что паровая машина превратила 10 больших калорий в работу, то мы сейчас сможем оценить величину этой работы—это будет 4270 килограмм-метров, и, наоборот, любое число килограмм-метров мы можем выразить в калориях.

Но ясно, что мы этим еще не подвигаемся в решении вопроса о коэффициенте полезного действия машины. Самое большее, что мы можем сказать, когда мы узнаем число килограмм-метров A, даваемых паровой машиной, так это то, что паровой машине надо было *по меньшей мере* сообщить $\frac{A}{427}$ калорий. Но ведь еще неизвестно, *насколько больше* для этого *надо было затратить тепла*, так как при получении работы за счет тепла далеко не все тепло используется для перевода в работу. Во-первых, в котельном помещении всегда жарко; ясно, что тепло, сообщенное воздуху, окружающему котел, не используется паровой машиной; кроме того, дым, выходящий из топки через дымовую трубу, уносит с собой много тепла, но оказывается, что и пар, отработанный „мятый“ пар, выходящий из цилиндра паровой машины, уносит с собой весьма значительную часть неиспользованного тепла. Коэффициентом полезного действия называется отношение полученной полезной работы A к общему количеству тепла Q, затраченного на приведение в действие паровой машины, считая и все потери. Итак, коэффициент полезного действия $K=\frac{A}{Q}$... (1) или $K=\frac{A}{Q} \cdot 100$..... (1'), если мы хотим выразить K в процентах. Само собой разумеется, что и A и Q должны быть выражены в одних и тех же единицах: или A и Q надо выразить в калориях, или то и другое перевести в килограмм-метры. Чтобы для нас была яснее вся картина процесса, посмотрим, как определяется

полезная работа двигателя. На ось двигателя, полезную работу которого мы хотим измерить, надевается шкив (см. рис. 116). Шкив охватывается ремнем, который при посредстве двух пружинных весов B и B_1 подтягивается гайками q,q к подставке C. Пусть указатели весов показывают по 10 делений — это достигается подтягиванием гаек q,q.

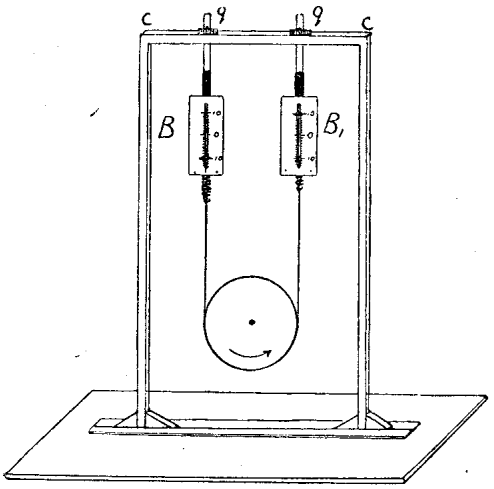


Рис. 116.

Пускаем в ход двигатель. Раз двигатель вертится—это значит, что шкив скользит по ремню и увлекает его силой трения, но этому трению противодействуют пружины весов. Положим, что теперь одни весы показывают 15 делений, другие—5; происходит это потому, что ремень шкивом увлекается в одну сторону, натягивая одну из пружин и сжимая другую, но так как обе пружины были сильно натянуты, то и у второй пружины некоторое растяжение остается; сжатие, вызванное движущимся ремнем, меньше первоначального растяжения. Таким образом, сила трения измеряется разностью показаний наших весов 15—5=10 делений. Но, по закону равенства действия и противодействия, такая же сила приложена к вращающемуся шкиву, и ее именно и преодолевает двигатель. Пусть окружность шкива [1])—мы ее можем измерить веревкой и отмерить потом сантиметровой линейкой—равняется s сант. Пусть в минуту мотор, заторможенный отчасти ремнем, делает n оборотов. Тогда путь, проходимый любой точкой окружности в минуту, будет ns, а работа, производимая мотором—ns. P=A, где P сила трения, измеряемая разностью показания весов — в нашем примере сила, соответствующая 10 делениям пружинных весов, и A величина работы. Итак, мы можем опытным путем узнать, какую полезную работу

[1]) Если радиус шкива r, то $s=2\pi r$.

нам может дать тот или другой двигатель, тормозя любой двигатель ремнем с пружинными весами и подтягивая ремень, как это мы делали на нашей модели гайками q q (см. рис. 116), до тех пор, пока мотор не получит ту же скорость вращения, как и при полезной нагрузке, общее же количество энергии, затраченное на работу парового двигателя, определится количеством топлива и его теплотворной способностью, о чем мы уже говорили (см. II лекцию). Совершенно ясно, что усилия всех инженеров были направлены на то, чтобы предотвратить возможные потери. Самый важный источник потерь, оказывается, состоит в том, что пар, произведший уже работу в цилиндре, заключает в себе еще значительное количество тепла, которое, однако, не может быть использовано для превращения в работу. Опыт и теория показывают, что тепло тем легче может быть преобразовано в работу и тем большая его доля переходит фактически в работу, чем температура его выше, так что число калорий, которыми мы располагаем, само по себе еще не предрешает вопроса о том, сколько мы в состоянии будем получить полезной работы с машиной, имеющей определенный коэффициент полезного действия. 100 калорий при 100^0 С и 100 калорий при 300^0 С представляют для нас неодинаковую ценность в смысле возможности превращения тепла в работу. Чтобы выяснить себе это, разберем конкретный пример. Представим себе, что мы имеем 2 совершенно одинаковые сажени сухих березовых дров, так что при сгорании этих двух саженей мы получим равное количество тепла. Пусть одну сажень мы сожгли в топке благоустроенного котла паровой машины, а другую сожгли в топке котла водяного отопления в здании, где помещается наша аудитория. В первом случае мы получаем тепло, сосредоточенное в небольшом пространстве парового котла при высокой температуре. Паровая машина, питаемая этим котлом, дает нам известное количество полезной работы. Во втором случае то же число калорий распространилось на все здание, в котором мы находимся; вследствие этого *температура, при которой находится это тепло, будет значительно ниже.* В то же время это тепло оказывается уже в значительной степени менее способным к превращению в работу. Самое большее, что мы сможем сделать в этом случае—это поставить в окне т. н. вентилятор в виде колеса с

наклонными лопастями, вставленного в трубку. Если воздух в комнате теплее, чем снаружи, то по трубе устанавливается ток теплого воздуха, который и приводит во вращательное движение колесо. Таким образом, тепло воздуха натопленной комнаты, переходя по трубе в холодное пространство, окружающее наше здание, частью превращается в работу. Едва ли стоит распространяться о том, что в работу при этих условиях переходит ничтожнейшая часть всего количества тепла. Коэффициент полезного действия в этом случае будет очень мал. Для того, чтобы вообще тепло могло переходить в работу, необходимо, чтобы, наряду с источниками тепла, были тела, имеющие температуру более низкую, чем самый источник тепла—эти тела мы для сокращения будем называть „холодильниками". Если пар, впущенный в цилиндр паровой машины и имеющий температуру пара в котле (мы предполагаем, что мы устранили потери при переходе из котла в машину), после расширения примет температуру холодильника, то дальше уже тепло, еще заключающееся в этом паре, использовано быть не может. Таким образом, преобразование тепла в работу идет тем успешнее, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника. Присутствие холодильника необходимо.

Как показывает опыт, превращение тепла в работу возможно только тогда, когда наряду с этим процессом идет другой, выражающийся в том, что некоторое количество тепла переходит от нагревателя к холодильнику. Эта особенность была отмечена еще французским инженером Карно в 20-х годах XIX века. Карно думал, что, подобно тому, как вода может двигать мельничное колесо только тогда, когда она падает с более высокого уровня на более низкий, и тепло может быть источником работы только, когда оно переходит от более высокой температуры к более низкой, причем количество тепла при этом не уменьшается, так же, как и количество воды. Последнее утверждение неверно, оно об'ясняется тем, что Карно имел неправильные представления о природе тепла; он думал, что тепло есть особое невесомое вещество—„теплород" или „флогистон"; но в общем его вывод оказался правильным в том смысле, что переход тепла в работу всегда сопровождается переходом тепла от источника тепла—нагревателя, имеющего более вы-

сокую температуру, к окружающим телам, имеющим более низкую температуру—к тому, что мы условились считать „холодильником". Без этого второго процесса не происходит превращения тепла в работу. Итак, чтобы получить работу из тепла, надо, по крайней мере, иметь два тела с различной температурой. Когда, например, благодаря неравномерному нагреванию земной поверхности солнцем, возникает ветер, то это и есть случай превращения тепла в работу, но при этом громадное количество тепла уходит с поверхности земли в окружающее мировое пространство. Если подсчитать, какое количество тепла превратилось в работу ветра и какое рассеялось с поверхности земли в мировое пространство, то окажется, что коэффициент полезного действия этой природной машины ничтожно мал. *Таким образом, можно считать прочно установленным, что нельзя построить периодически действующую машину* (т. е. машину, движение которой повторялось бы как в любом двигателе после одного или нескольких оборотов [1]), *которая превращала бы тепло в работу и при этом не было потока тепла от нагревателя* (откуда машина черпает тепло) *к окружающим предметам* (холодильнику). Это положение носит название второго закона механической теории тепла или „термодинамики" (от греческого слова термос, что значит тепло). Первым законом термодинамики называется приложение закона сохранения энергии к тепловым явлениям, т. е. утверждение, что исчезнувшей и появляющейся работе соответствует эквивалентное (равнозначное) ей количество тепла.

Если мы примем второй закон механической теории тепла, как данное, то из него можно сделать следующий вывод: коэффициент полезного действия „идеальной" машины, т. е. машины, в которой устранено трение, устранены все бесполезные потери тепла, зависит следующим образом от температуры нагревателя и холодильника:

$$K = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \ldots \quad (II)$$

Здесь A обозначает полезную работу; Q_1—количество тепла, взятое у нагревателя и частью превращенное в ра-

[1]) Когда, напр., поршень паровой машины пройдет внутри цилиндра один раз взад и вперед, он возвращается на прежнее свое место—движение в дальнейшем будет уже повторяться. Такое постоянно повторяющееся движение и называется периодическим.

боту, а частью отданное холодильнику. T_1 и T_2 так называемые абсолютные температуры нагревателя и холодильника, т. е. температуры, отсчитанные по термометру Цельсия, к которым прибавлено 273°—как будто бы им отсчитывали не от 0°С, а от—273 (от 273° мороза). Какой смысл имеет эта „абсолютная температура? Представим себе некоторый об'ем газа при 0°; пусть давление этого газа будет равно нормальному атмосферному давлению $p^0=760$ миллиметров ртутного столба. Если мы охладим этот газ на 1°С, то, как показывает опыт, давление уменьшится на $\frac{1}{273}$ часть, т. е. будет уже не p_0, а $p_0-\frac{p_0}{273}$; если мы охладим на 2° ниже 0, то давление будет $p_0-\frac{2}{273}p_0$; наконец, если бы нам удалось охладить до 273° мороза, то давление должно получиться $p_0-\frac{273}{273}p_0=0$. А что значит давление равно 0? Это значит, что частицы газа перестали ударяться в стенки сосуда — их поступательное движение прекратилось [1]).

Если холодильник находится при абсолютном нуле, т. е. $T_2=0$, то, как видно из формулы (II), коэффициент полезного действия $K=1$, т. е. все тепло „нацело" превращается в работу. Что значит, что холодильник находится при абсолютном нуле? Это значит, что частицы пара, отданного машиной холодильнику, лишены поступательного движения, а это значит, что мы все их движение использовали для полезной работы. Таким образом, это следствие из полученной формулы (II) становится понятным [2]).

Мы не пытались выводить формулу (II)—это заняло бы очень много времени,—мы указали на основные посылки, из

---

[1]) Тех, кто боится впасть в „метафизику", допуская материю без движения, можно успокоить. Речь идет об одном только поступательном движении. Повидимому, вращательное движение остается и при абсолютном нуле, а кроме того, если охлаждение произошло на земном шаре, то ведь движение земного шара и солнечной системы остается.

[2]) Мы должны, однако, сделать оговорку. Не следует думать, что мы в действительности можем уменьшать величину давления газа на 1/273 на каждый градус вплоть до абсолютного нуля; гораздо раньше газ превратится в жидкое состояние, а тогда закон изменения давления с температурой будет другой. Наше рассуждение имеет чисто теоретический характер; мы рассчитываем так, как будто бы упругость убывала вплоть до абсолютного нуля на 1/273 на каждый градус. Но, несмотря на это, мы пришли к правильному определению абсолютного нуля, как температуры, при которой поступательное движение частиц прекращается.

которых она выводится. Чтобы, все-таки, у Вас не было неприятного чувства принимать что-то на веру, заметим, что ведь формула (II) как раз выражает то, о чем у нас шла речь. Мы видели, на основании ряда фактов, что чем выше температура нагревателя, по сравнению с холодильником, тем больше коэффициент полезного действия. Вспомним о паровой машине и вентиляторе в натопленной комнате. Но это ведь и выражает наша формула. В самом деле, пусть нагреватель имеет 100° С, а холодильник—0°, тогда коэффициент полезного действия $К=\frac{100}{373}=0{,}268$ или 26,8%. Итак, идеально действующая, без всяких потерь, машина может перевести в работу только одну четверть всего предоставленного ей тепла, если нагреватель имеет 100°, а холодильник 0° С. Пусть температура натопленной комнаты будет 15° С или 288 по абсолютной скале и пусть на воздухе температура 0° С. Тогда идеальная машина, работающая с такими нагревателем и холодильником, будет иметь следующий коэффициент полезного действия: $К=\frac{15}{288}=0{,}052$ или 5,2%.

Какие мы из этого сделаем выводы? Ясно, что для лучшего использования тепла надо стараться получать его при более высокой температуре. Это и достигается в т. н. двигателях внутреннего сгорания. На рис. 117 изображена схема действия так называемого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. При первом „такте"—продвижение поршня от дна цилиндра—в цилиндр засасывается горючая смесь чрез клапан А. При втором „такте" смесь сжимается, оба клапана А и В закрыты. При третьем „такте" происходит взрыв (оба клапаны закрыты), поршень выталкивается (рабочий ход) и, наконец, при четвертом „такте" открывается клапан В, и движением поршня к дну цилиндра выбрасываются продукты сгорания. Самое существенное в этом процессе состоит в том, что взрыв, сопровождающийся сильным повышением температуры, происходит в самом рабочем цилиндре, чем устраняются потери, имеющие место, например, при проводке пара из котла в машину. А, кроме того, тепло, образующееся при взрыве, имеет очень высокую температуру, мы имеем как бы нагреватель с очень высокой температурой. Поэтому коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания сравнительно очень высок — до 34%.

Другой вывод, к которому мы приходим на основании всех разобранных сейчас соображений, сводится к тому, что тепло имеет отличительную особенность, выделяющую его из всех других форм энергии. Тепло непрерывно рассеивается—оно переходит из областей, где температура выше, туда, где она ниже. А тепло, находящееся при более низкой

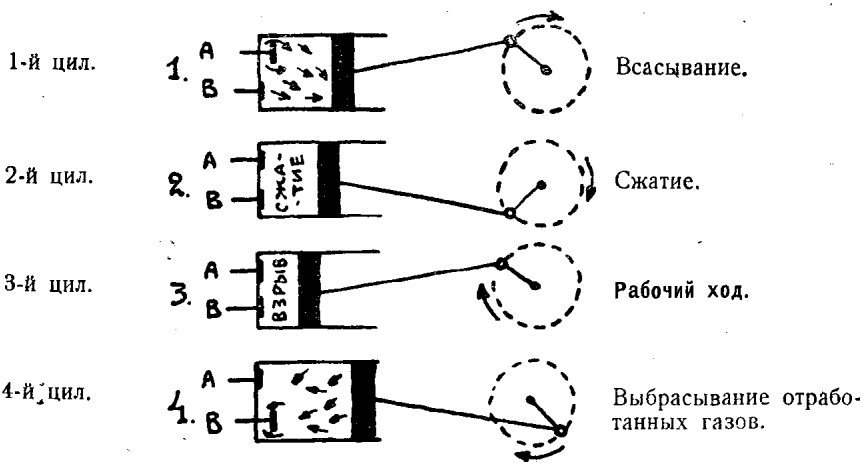


Рис. 117.

температуре, уже менее способно превращаться в механическую работу и другие виды энергии; таким образом, мы наблюдаем в природе односторонний процесс. Превращение всех форм энергии в тепло может происходить нацело, обратный переход, как правило, происходит не нацело, и притом еще тепловая энергия рассеивается; причем—чем больше она рассеялась, тем меньше она способна переходить в другие формы. Вот почему II закон термодинамики часто называют законом „рассеяния энергии“ [1]).

Само собой понятно, что из этого положения, вытекающего из опытного исследования природы, легко сделать далеко идущие выводы. Мы как раз подходим к тому месту, где вступают в свои права идеологические наслоения, при-

[1]) Часто говорят, будто закон рассеяния энергии противоречит закону сохранения энергии на том основании, что раз энергия рассеялась и мы ею не можем воспользоваться, значит ее нет! Если рассуждать таким образом и быть последовательным, то надо говорить, что вода безвозвратно исчезла, если я вылью стакан с водой на землю, и она всосется, так как я ведь ее выпить не могу. Подобные возражения против закона рассеяния энергии делал философ Мах, считавший, что мир—это совокупность наших ощущений, а чего мы не ощущаем, того, значит, и не существует!

дающие научным выводам порой весьма недвусмысленную классовую окраску. Так, сделанному сейчас выводу можно придать абсолютный неизменный характер. Можно сказать, что так как процесс рассеяния энергии идет везде—во всем мире, то рано или поздно вся энергия перейдет в форму тепла, и тогда не будет больше никаких преобразований энергии, никаких явлений вообще—наступит конец мира—„тепловая смерть“! Весь мир, который мы видим, значит, был когда-то сотворен, и на наших глазах он роковым образом идет к своему концу, после чего уже ничего вообще не будет.... Таким образом подводится будто бы научное обоснование под религиозные вымыслы о конце мира, втором пришествии и проч. Причем эти подогретые пережитки старины порой очень недвусмысленно связываются с очень злободневными мотивами. Так проф. Тэт, еще во второй половине XIX столетия видевший, что дело идет к социализму, сравнил эту „тенденцию“ в общественном развитии с законом рассеяния энергии: он не отрицал того, что неприятно тому классу, на точке зрения которого он стоял, наоборот, он готов был признать, что переход от капитализма к социализму совершится с железной необходимостью, но это есть симптом гибели общества вообще—приближения его смерти! Это своего рода „тепловая смерть“.

Если мы станем на точку зрения „чистого описания“, если мы не будем пытаться об'яснять закон рассеяния энергии, то нам трудно будет вырвать основу из-под специфически классовых выводов, какие делались и делаются из закона рассеяния энергии. Чтобы опровергнуть теорию тепловой смерти, нам придется ответить на вопрос, почему тепловая энергия отличается от других форм энергии? А рассмотреть, как решает современная физика этот вопрос, нам будет не так уж трудно, так как мы уже познакомились с основами кинетической теории материи. Нам легко будет выяснить основную мысль, высказанную впервые знаменитым венским профессором Людвигом Больтцманном. Почему тепловая энергия рассеивается? Так как тепло есть движение частиц, то рассеяние энергии есть не что иное, как результат передачи энергии быстро движущихся частиц—частицам, движущимся медленнее. Если мы выпустим горячий пар в холодный цилиндр, то быстро движущиеся частицы пара, ударяясь о

холодные стенки, передадут им часть своей энергии: частицы, составляющие стенку, начнут колебаться быстрее, они в свою очередь передадут часть энергии окружающим цилиндр частицам более холодного воздуха и т. д. Так как при взаимных встречах и столкновениях движущихся частиц происходит частичная передача энергии, то самый факт рассеяния энергии об'ясняется тем, что тепловая энергия есть движение частиц, составляющих материю, а, кроме того, изучаемые нами предметы все находятся во взаимной связи: пар соприкасается со стенками цилиндра, стенки цилиндра—с воздухом того помещения, где стоит машина, этот воздух в свою очередь—со стенами здания и т. д. Почему тепловая энергия используется только отчасти в том смысле, что мы только часть тепловой энергии можем перевести в работу? Это вытекает из того, что тепловое движение не принадлежит к числу „стройных" движений, при которых все частицы, как, напр., у брошенного камня, движутся с большим приближением все одинаково. Наоборот, в нагретом газе или паре частицы движутся в полном беспорядке, как шарики на модели Эйхенвальда, которую мы изучали (см. X лекцию). Это „нестройное" движение мы не можем превратить нацело в „стройное", потому что не можем воздействовать на каждую молекулу в отдельности и заставить ее, как и все другие, двигаться в каком-либо определенном направлении—все сразу. Для того, чтобы „нестройное" движение перевести хотя отчасти в стройное, мы все-таки должны в нестройном беспорядочном движении навести некоторый порядок. Мы собираем для этого все быстро движущиеся частицы (например, пар в паровой машине или взорвавшаяся горючая смесь в двигателе внутреннего сгорания)—в одно место—в цилиндр под поршнем. По другую сторону поршня у нас будут молекулы воздуха при более низкой температуре. Разница температур, таким образом, является необходимым условием для перехода нестройного движения в стройное. Элемент организации или „порядка" состоит в том, что средняя скорость частиц внутри цилиндра больше, чем снаружи. Поэтому „толчки" при ударах о поршень будут сильнее для частиц, ударяющихся изнутри цилиндра, чем для тех, которые ударяются снаружи. Этот перевес и обусловливает „стройное движение" поршня. Когда температура газа под поршнем сравняется с температурой

окружающего воздуха, дальнейшего движения получаться не будет, так как толчки с той и другой стороны сравняются по своей силе. Таким образом, энергия в газе или паре может оставаться еще и очень большой, но использовать ее для превращения в стройное движение мы больше не можем.

Если температура в газе или жидкости, находящейся в каком-либо сосуде, во всех его частях будет одинакова, то казалось бы, что в этом сосуде не может возникнуть стройного движения. Если мы станем на точку зрения „чистого описания"—будем определять коэффициенты полезного действия тепловых машин, не задумываясь над вопросом, почему тепловая энергия только отчасти может быть использована для получения механической работы, то мы должны сказать, что принципиально невозможно в этом случае получить стройное движение. Если же мы станем на точку зрения кинетической теории, то, как показал Больтцманн, переход из нестройного движения в стройное представляется вполне возможным, хотя этот переход, как мало вероятный, наблюдается не часто. Подобный переход нестройного движения в стройное уже наблюдался в начале XIX столетия английским ботаником Брауном, но только в 1908 году французский физик Жан Перрен окончательно выяснил механизм этого явления и показал, что это явление блестящим образом подтверждает теоретические взгляды Больтцманна.

Самое явление носит название Брауновского движения, в честь Брауна, его открывшего, и состоит в следующем. Если в воде находятся во взвешенном состоянии микроскопические частички: споры растений, мельчайшие крупинки краски—желтая краска гумми-гутт, приготовляемая из смолы тропических растений, особенно удобна для этих опытов,—то, несмотря на равенство температуры во всех частях той капли, в которой производится наблюдение, эти взвешенные частицы находятся в непрерывном движении. Эти движения равно, как и самые частицы, видны только при помощи микроскопа. Чем мельче частицы, тем быстрее они движутся. Движение имеет самый беспорядочный характер—это скорее толчение на месте; но, чем мельче частицы, тем дальше они смещаются при этом беспорядочном движении. На рис. 118 изображен зарисованный путь одной такой

частицы. После лекции мы все увидим это явление в микроскопе, причем изображение микроскопического препарата с движущимися частицами мы отбросим с помощью фонаря на экран, так что наблюдать это явление можно будет зараз 10 или 20 товарищам. Чем об'ясняется это движение? Если мы станем на точку зрения кинетической теории, то мы должны допустить, что все частицы воды находятся в непрерывных движениях, при этом они должны сталкиваться с взвешенными в воде частицами краски. Так как движение частиц воды вполне беспорядочное, то в среднем число ударов молекул воды с каждой стороны по взвешенной частице будет одинаково, но в отдельные моменты число ударов с какой-либо одной стороны может быть больше или меньше, чем с других. Это неравенство в числе ударов невидимых глазу молекул воды вызовет видимое в микроскопе движение частицы. Чем мельче частица, тем меньший перевес в числе ударов с какой-либо одной стороны частицы нужен, чтобы вызвать видимое движение, поэтому мелкие частицы движутся все время; более крупные и меньше смещаются и вообще реже приходят в движение, они долгое время остаются неподвижными. Точно также, если я, например, бросаю монету подряд большое число раз, то в среднем у меня получится одинаковое число „орлов" и „решеток", потому что условия для получения „орла" ничем не отличаются от условия получения „решетки". Но если мы возьмем небольшое число опытов, то у нас довольно часто будут попадаться случаи, когда два или три раза подряд выпадает „решетка", будут и случаи, когда мы подряд получим пять или шесть раз „решетку", но они будут встречаться реже. Точно также для поступательного движения малой частицы надо сравнительно небольшой перевес в ударах молекул о частицу с одной стороны — эти случаи происходят чаще--*они более вероятны.* Движение большой частицы требует уже стечения особенно благоприятных условий—это случается менее часто, такое событие менее вероятно. Правильность этой точки зрения подтверждается целым рядом

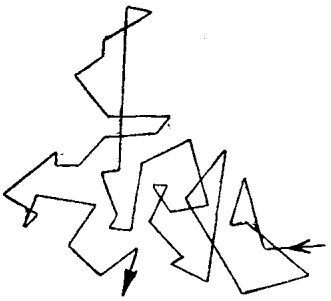


Рис. 118.

опытов. Так, например, чем выше температура, тем оживленнее движение невидимых глазу молекул воды и тем оживленнее должно быть Брауновское движение, это предсказание теории вполне подтвердилось. Далее, Брауновское движение можно наблюдать не только в жидкостях, но и в газах на взвешенных частицах, например, на частицах дыма. Если мы будем уменьшать давление газа, то частицы газа будут расположены гораздо реже, взвешенные, более крупные частицы дыма—более крупные по сравнению с молекулами—будут двигаться свободнее в разреженном газе, и действительно, как показали опыты Флетчера в Америке, по мере увеличения разрежения, частица, движущаяся Брауновским движением, начинает делать все более и более длинные полеты в разные стороны. Картину этого движения можно пояснить следующим сравнением; представим себе мяч в густой толпе играющих в фут-бол: мяч топчется на месте в узком кольце игроков, но вот игроки разбежались по всему полю, тогда и мяч будет перелетать на большие расстояния от игрока к игроку. Все эти опыты имеют огромное принципиальное значение: раз переход из нестройного движения в стройное возможен даже при условии, когда во всей системе, где происходит этот переход, установилась одинаковая температура, то вся теория „тепловой смерти" падает. В самом деле, переход из нестройного движения в стройное возможен и в большом масштабе, хотя это и очень мало вероятное событие. Для громадных же промежутков времени, в течение которых происходит развитие звездных систем, и с такими мало вероятными событиями приходится считаться. Если очень долго упражняться в игру в „орлянку", то наверное попадутся случаи, когда двадцать раз подряд выпадет орел или решетка, такие случаи будут очень редки, но они все-таки будут. Будет ли такое явление „чудом"? Нисколько; если бы мы могли знать, как каждый раз монета располагается в нашей руке, как двигается наша рука, какой толчок и с какой стороны она дает монете, то мы заранее могли бы сказать, когда получится орел и когда—решетка и когда мы будем наблюдать под ряд 20 выпадений решетки. Точно также, если бы мы знали и могли учитывать движение каждой молекулы, то мы могли бы рассчитать, когда то или другое число молекул будет двигаться параллельно в одну и ту

же сторону, т. е. когда из нестройного движения возникает стройное, так что и эти мало вероятные явления подчинены железным законам, хотя все условия этого явления для нас неизвестны постольку, поскольку мы не можем непосредственно наблюдать движение отдельных молекул. Таким образом, вместо одностороннего превращения стройных движений в нестройное, имеющее своим последствием тепловую смерть вселенной, мы видим в природе диалектический процесс возникновения развития и исчезновения стройного движения, новое его возникновение и т. д. Более глубокий анализ закона рассеяния энергии, который впервые был выполнен Больтцманном, показал, что этот закон, об'ясняя причину гибели солнечной системы, в то же время об'ясняет причину возникновения стройных движений—возникновения новых миров. Взгляды Больтцманна получили косвенное подтверждение в новейших исследованиях звездной астрономии. Так, значительное число красных потухающих звезд—значительное по сравнению с горячими белыми звездами—считалось веским доказательством в пользу тепловой смерти. Теперь оказалось, что значительная часть красных звезд на самом деле не только не потухает, но, наоборот, разгорается. Дальнейшее изучение звездного мира показало, что звезд разгорающихся столько же, сколько и потухающих. Мы можем говорить о потухании, о гибели какой-либо отдельной звезды и окружающих ее планет, как, например, солнечной системы, но мы знаем, что наряду с этой гибелью одних миров нарождаются новые: мы можем теперь изучать звезды и планетные системы в „их возникновении, развитии и разрушении".

Новейшие исследования в области учения о рассеянии энергии, которое по началу служило почвой для укрепления религиозных предрассудков, теперь являются едва ли не самым блестящим подтверждением революционного оружия марксиста—диалектического метода.

Взгляды Больтцманна, которые теперь подтверждены на опыте и против которых серьезных возражений уже никто не делает, по вполне понятным причинам тщательно замалчиваются, особенно в популярно-научной и философской литературе. Это опять очень яркий пример проникновения классовых идеологий в научную работу.

Мы пришли к концу первой части курса физики. Несмотря на краткий срок,—всего двенадцать двухчасовых бесед,—мы затронули большое число самых разнообразных вопросов, связанных как с явлениями в окружающей нас природе, так и с целым рядом явлений и законов, лежащих в основе современной техники Но если мы вспомним те об'яснения, которые были нами найдены для всех рассмотренных разнообразных явлений, то мы не можем не поразиться удивительным единством. Все, что мы изучали до сих пор, свелось в конечном счете к движению или видимых глазу предметов или невидимых глазу молекул и атомов, из которых эти предметы построены. Итак, все физические явления, которыми мы с вами занимались, как здесь в аудитории, так и в лаборатории, свелись к движению того, что движется, к движению того, что мы называем материей.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Стр.

Предисловие 1

Лекция первая 3

Почему изучение физики надо начинать с учения о движении—с механики. Как составляют описания движений. Движение прямолинейное, равномерное и равномерно-ускоренное. Сложение движений. Движение криволинейное.

Лекция вторая 19

Что называется силой? Определение силы по Ньютону. Что называется работой и энергией. Формы энергии и их превращения. Закон сохранения энергии. Как учитывают запасы энергии.

Лекция третья 36

При каких условиях силы не вызывают движения. Простые примеры на равновесие. Параллелограмм сил. Общий закон равновесия—принцип Лагранжа.

Лекция четвертая 51

Движение под действием постоянной силы. Равномерно-ускоренное движение. Сила, масса и ускорение. Все ли тела падают на землю с одинаковой скоростью? Сопротивление воздуха. Падение тел в разреженном газе.

Лекция пятая 66

Равенство действия и противодействия. Применение этого положения к случаю движущихся тел. Силы инерции. Центростремительная и центробежная силы.

Лекция шестая 85

Всемирное тяготение. Сила тяжести и всемирное тяготение. Опыт Кавендиша. Как можно определить массу земного шара. Как доказать вращение земного шара. Маятник Фуко. История земного шара.

Лекция седьмая 103

Чем отличаются друг от друга жидкости, газы и твердые тела. Условия равновесия жидкостей. Гидравлический пресс. Давление на дно сосуда. Парадокс Паскаля. Как определяется давление и вес воздуха. Устройство воздушного насоса.

Лекция восьмая 121

Отступления от законов равновесия жидкостей. Молекулярные силы сцепления. Поверхностное натяжение. Факты, доказывающие существование поверхностной пленки. Явление смачивания. Об'яснение отступлений от закона равновесия.

Лекция девятая 136
Ощущения тепла и холода. Об'ективная оценка температуры. Расширение тел при нагревании. Практические применения. Электрические термометры—термоэлементы. Теплопроводность и конвекция.

Лекция десятая 154
Движение атомов и молекул. Кинетическая теория материи. Строение газа. Модель газа по Эйхенвальду. Об'яснение закона Бойля-Мариотта. Диффузия газов. Условие образования облака и тумана. Роль пыли.

Лекция одиннадцатая 170
Переход из жидкого состояния в парообразное или газообразное. Теория подвижного равновесия. Измерение давлений—манометр. „Скрытое" тепло испарения. Переход из твердого состояния в жидкое и обратно.

Лекция двенадцатая 185
Коэффициент полезного действия паровой машины. Превращения тепла в работу. Условный характер этого превращения. Нагреватель и холодильник. Рассеяние энергии „тепловая смерть". Об'яснение рассеяния энергии с точки зрения кинетической теории материи. Работы Больтцманна. Возникновение, развитие и гибель миров.