

П. ДЖ. ТЭТЪ.

ТЕПЛОТА.

(HEAT).

ПЕРЕВОДЪ СЪ АНГЛІЙСКАГО

Н. С. Дрентельна

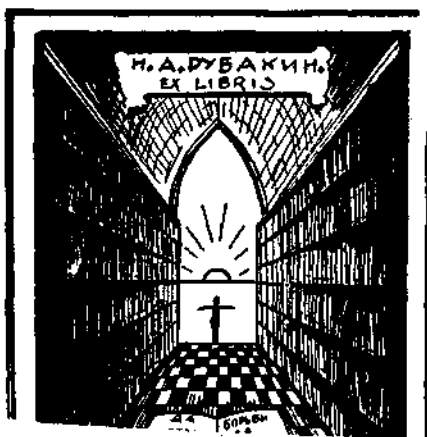
ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ С. А. Усова.

Съ 53 рисунками.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Изданіе Л. Ф. Пантелѣева.

1888.



135/68

Типографі:

ПРЕДИСЛОВІЕ АВТОРА.

Начало этого сочиненія было положено статьей, которую я далъ въ 1876 г. въ *Handbook to the Loan Collection of Scientific Apparatus* (South Kensington). Такъ какъ статья была основана на той системѣ преподаванія теплоты, которую послѣ многихъ лѣтъ опыта я нашелъ наиболее подходящею къ требованіямъ интеллигентныхъ студентовъ, приступающихъ впервые къ предмету, то Mr. Macmillan предложилъ мнѣ выработать изъ этой статьи элементарное руководство. Значительная часть сочиненія была написана въ 1876—7 годахъ: большая часть написаннаго была напечатана и подверглась цѣнной критикѣ Клеркъ-Максвелля. Нѣсколькими первыми главами я воспользовался при прочтеніи вечерней лекціи въ собраніи *Британской Ассоціаціи* въ 1876 году.

Разнаго рода неотложныя занятія, какъ напр. изслѣдованіе термометровъ *Challenger'a*, отъ времени до времени отрывали меня отъ писанія книги, занимая всѣ мои досуги. Наконецъ, я справился съ книгою и окончилъ ее, по возможности, по тому плану, который былъ предположенъ вначалѣ; но при этихъ обстоятельствахъ

нельзя ожидать, чтобы она имѣла то единство, которое могло бы быть достигнуто при непрерывной работѣ.

Можно спросить: для чего издавать учебникъ по предмету, который уже сполна изложенъ въ прекрасныхъ (и строго научныхъ) сочиненіяхъ Клеркъ-Максвелля и Бальфуръ Стьюарта? Единственный и вполне достаточный отвѣтъ будетъ слѣдующій. Сочиненіе Клеркъ-Максвелля посвящено *теоріи теплоты* и приспособлено для изученія; сочиненіе Стьюарта пригодно скорѣе для физической лабораторіи; такимъ образомъ не достааетъ еще книги, назначенной для аудиторіи. Подъ этимъ я разумѣю сочиненіе, пригодное для тѣхъ студентовъ, которые, не имѣя намѣренія избирать научной карьеры, ни теоретической, ни экспериментальной, желаютъ однако знать наиболѣе выдающіеся факты и теоріи современной науки въ такомъ размѣрѣ, чтобы у нихъ могъ развиваться сознательный интересъ къ физическимъ явленіямъ.

Въ дополненіе къ тому, что говорится въ текстѣ (§ 11) о расположеніи и раздѣленіи предмета въ этомъ трудѣ, нелишнее сказать здѣсь нѣсколько словъ о способѣ обработки важныхъ статей, относящихся до температуры и въ особенности до абсолютной температуры.

Температура сперва вводится просто въ качествѣ условія, опредѣляющаго, которое изъ двухъ тѣлъ, приведенныхъ въ соприкосновеніе, будетъ отдавать часть теплоты другому (§ 6). Въ этомъ смыслѣ она сравнивается съ *давленіемъ* воздуха въ приемникѣ, причемъ самый воздухъ является аналогичнымъ теплотѣ (§ 52). Если сообщить другъ съ другомъ два такихъ приемника, то воздухъ переходитъ изъ того, въ которомъ давленіе больше, въ тотъ, гдѣ давленіе меньше. И это совершен-

но не зависить отъ относительныхъ количествъ воздуха въ обоихъ приемникахъ.

Въ § 57 указано на то, что существуетъ *абсолютный* методъ опредѣленія (defining) температуры, который, следовательно, и долженъ быть единственно научнымъ методомъ. Но вмѣстѣ съ тѣмъ сказано, что при экспериментальныхъ работахъ лишь немногія величины прямо измѣряются къ функции тѣхъ строго научныхъ единицъ, въ которыхъ онѣ окончательно выражаются. Въ § 60 читатель узнаеть, что для подготовленія его къ пониманію абсолютнаго измѣренія температуры требуется «нѣчто такое, что одновременно легко понималось и воспроизводилось бы и что потребовало бы впоследствии лишь очень малаго измѣненія для перехода къ абсолютной шкалѣ».

Такимъ образомъ дается (§ 61) *временное* опредѣленіе стоградусной шкалы при помощи смѣсей изъ воды при температурѣ тающего льда и кипящей воды. Эта шкала, какъ здѣсь же сказано, «настолько согласуется съ абсолютной шкалой, что требуются тщательные опыты даже для того, чтобы показать ее неполное совпаденіе съ абсолютной шкалой».

При помощи данного такимъ образомъ опредѣленія температуры, излагаются съ опытной точки зрѣнія вопросы о расширенности, скрытой и удѣльной теплоты и т. д.

Но прежде этого, въ предварительномъ *очеркѣ* всего предмета, излагается круговой процессъ Карно и его начало обратимости, съ приложеніемъ ихъ, по Томсона, къ абсолютному измѣренію температуры. Здѣсь указано (§ 95), что результаты Карно оставляютъ еще нѣкоторый произволъ въ формальномъ опредѣленіи абсолют-

ной температуры, и что Томсонъ нашелъ возможнымъ дать такое опредѣленіе (оно здѣсь и приводится), которымъ устанавливается тѣсное согласіе между новой шкалою и шкалою обыкновеннаго воздушнаго термометра. Такимъ образомъ, употребленіе температуръ воздушнаго термометра въ послѣдующихъ главахъ оправдано большою близостью этихъ температуръ къ абсолютнымъ, также какъ сравнительными простотою и удобствомъ ихъ опредѣленія; онѣ употребляются затѣмъ до тѣхъ поръ, пока (съ помощью индикаторной діаграммы) не разъясняется все важное научное значеніе абсолютной температуры. Затѣмъ въ § 405 показывается, какъ сравнить абсолютную температуру съ температурою по воздушному термометру.

Всякія разсужденія *a priori* въ строго логическомъ порядкѣ, какъ бы они ни были цѣльны и въ сущности необходимы въ ученomъ трактатѣ, должны быть исключены изъ элементарнаго сочиненія, если оказывается на практикѣ, что они скорѣе мѣшаютъ, нежели способствуютъ успѣхамъ средняго учащагося. По этой именно причинѣ въ предлагаемомъ трудѣ принята объясненная выше система изложенія.

Кто ожидаетъ, что эта книга, какъ она ни элементарна, вездѣ легко читается, тотъ будетъ очень обманутъ. Ни одна отрасль науки не свободна отъ дѣйствительныхъ и большихъ трудностей, даже въ своихъ началахъ. Каждый думающій иначе или вообще ничего не читавъ, или ограничивався чтеніемъ ложно-научныхъ сочиненій.

Читатель, желающій узнать больше изъ общаго ученія объ энергіи, чѣмъ можно было дать въ этомъ сочи-

неніи, найдетъ связный историческій очеркъ въ моей книжкѣ о *термодинамикѣ*. Въ ней онъ также встрѣтитъ больше чисто аналитическаго развитія предмета, въ особенности съ Томсоновской точки зрѣнія ¹⁾.

P. G. Tait.

College, Edinburgh,
December 1 st., 1888.

¹⁾ Въ русскомъ переводѣ выноски, помѣченныя звездочкой *, принадлежатъ автору книги. Изъ остальныхъ (помѣченныхъ цифрами) одни взяты изъ нѣмецкаго изданія, другія сдѣланы русскимъ переводчикомъ.

ТЕПЛОТА.

ГЛАВА I.

Основные начала.

1. При изученіи любой отрасли физической науки слѣдуетъ непремѣнно имѣть въ виду слѣдующее основное и всеобщее начало:

Ничто не можетъ быть узнано изъ физическаго міра иначе, какъ путемъ наблюденія и опыта или математическихъ выводовъ изъ полученныхъ такимъ образомъ данныхъ.

На эту тему можно написать цѣлые томы; но они были бы излишни, потому что изучающій физику съ каждымъ шагомъ впередъ самъ будетъ все болѣе и болѣе проникаться убѣжденіемъ въ истинѣ принципа. Пусть учащійся сначала приметъ его на вѣру, какъ единодушное заключеніе всѣхъ тѣхъ, которые посвятили себя изученію истинной физической науки; и по мѣрѣ того, какъ онъ будетъ приобрѣтать знанія этимъ—единственнымъ—методомъ, для него будетъ становиться все яснѣе

и яснѣ полное безсиліе такъ-называемой метафизики, или мышленія *a priori*, подвинуть его хоть на одинъ шагъ впередъ.

2. Въ дѣлѣ познанія физическаго міра человѣкъ совершенно предоставленъ самому себѣ. Но онъ одаренъ *чувствами* (безъ которыхъ онъ даже не зналъ бы о существованіи физическаго міра) и *разумомъ*, дающимъ ему возможность провѣрять и понимать показанія чувствъ.

Одинъ разумъ безъ содѣйствія чувствъ совершенно беспиленъ въ этомъ дѣлѣ. Показанія чувствъ, не истолкованныя разумомъ, вообще не имѣютъ смысла. Но когда разумъ и чувства работаютъ гармонически вмѣстѣ, они открываютъ намъ безграничную ширь чудесъ для изслѣдованія. Здѣсь нѣтъ мѣста для отдыха, и въ этомъ признакъ настоящей науки: каждый истинный успѣхъ ея раскрываетъ столько новаго и легко доступнаго, что изслѣдователь едва успѣваетъ связать и установить узнанное, какъ уже въ его кладовую является новый матеріалъ.

3. Нашему зрѣнію вселенная кажется наполненной свѣтомъ—конечно, исключая мѣстъ, окруженныхъ непрозрачными тѣлами. Разумъ, контролируя показанія чувства, учитъ насъ, что свѣтовое ощущеніе лежитъ внутри насъ самихъ; что то, что мы называемъ свѣтомъ, не существуетъ внѣ нашего духовнаго міра. Онъ учитъ далѣе, что и ощущеніе «цвѣта» есть нѣчто чисто субъективное, ибо единственно возможное отличіе между такъ-называемыми лучами свѣта внѣ нашего глаза состоятъ лишь въ различной величинѣ, формѣ и быстротѣ колебаній свѣтоносной среды.

Нашему слуху воздухъ шумнаго города кажется наполненнымъ звуками. Разумъ, истолковывая показанія

чувства, учить, что если бы мы могли *видѣть* частички воздуха, то мы бы удостовѣрились, что, кромѣ быстрого движенія этихъ частицъ во всѣ стороны, въ наблюдаемомъ воздухѣ происходятъ лишь сравнительно медленныя поперебѣнные сгущенія и разрѣженія. Наша классификація звуковъ по силѣ, высотѣ и оттѣнку является лишь субъективнымъ отраженіемъ того, что объективно въ частицахъ воздуха есть та или другая степень сгущенія, быстрота колебаній и большая или меньшая сложность колебательнаго движенія.

Ударъ палкой или камнемъ производитъ боль и ушибъ; но движеніе падающаго камня до того момента, какъ онъ ударяетъ по нашему тѣлу, столь же отлично отъ ощущенія, производимаго ударомъ, какъ поперебѣнное сгущеніе и разрѣженіе воздуха—отъ ощущенія звука или волнообразное движеніе эфира—отъ ощущенія свѣта.

Поэтому говорить о томъ, что мы обыкновенно разумѣемъ подъ свѣтомъ или звукомъ, какъ о чемъ то существующемъ внѣ насъ, такъ же бессмысленно, какъ смѣшивать быстро движущуюся палку или камень съ болью. Но мы устранимъ всякое недоразумѣніе, если условимся употреблять выраженія свѣтъ и звукъ для обозначенія объективныхъ явленій, а ихъ субъективныя дѣйствія будемъ называть свѣтовыми и звуковыми «впечатлѣніями». Въ этомъ смыслѣ внѣ насъ существуетъ лишь энергія движенія разнаго рода, въ нашемъ же сознаниі—соотвѣтствующія впечатлѣнія свѣта и цвѣта, шума или гармоніи, боли и т. д.

4. Отсюда слѣдуетъ, что мы должны быть чрезвычайно осторожны въ истолкованіи нашихъ непосредственныхъ ощущеній и въ отношеніи теплоты. Изъ са-

момъ дѣлѣ, первый опытъ вполне убѣждаетъ насъ въ этомъ.

Прикоснемся последовательно къ разнымъ вещамъ на столѣ. Прессъ-папье, особенно если оно металлическое, будетъ обыкновенно холодно на ощупь; книги, бумага и въ особенности шерстяная скатерть стола—сравнительно теплы. Но испытайте ихъ не на ощупь, а *термометромъ*, и по всей вѣроятности вы найдете лишь ничтожныя разницы, или даже никакой, въ томъ, что мы называемъ ихъ *температурой*. Мы увидимъ въ самомъ дѣлѣ, что сколько бы ни было какихъ угодно предметовъ въ одномъ помѣщеніи (въ которомъ нѣтъ ни огня, ни другого источника теплоты), всѣ они стремятся окончательно принять одну и ту же температуру. Почему же одни на ощупь кажутся холодными, другіе теплыми?

Дѣло просто въ томъ, что осязаніе не указываетъ намъ прямо температуру, а лишь *быстроту*, съ какой наши пальцы *приобрѣтаютъ или теряютъ теплоту*. Предметы въ комнатѣ вообще бываютъ холоднѣе руки; теплота же всегда стремится переходить съ болѣе теплаго тѣла на болѣе холодное. Изъ нѣсколькихъ предметовъ, одинаково холодныхъ по отношенію къ рукѣ, тотъ покажется наиболѣе холоднымъ на ощупь, который способенъ *быстрѣе всего* отводить теплоту руки. Слѣдовательно, нашъ вопросъ сводится къ *теплопроводности*. Чтобы въ томъ удостовѣриться, обернемъ пропессъ: тогда мы *сдѣлаемъ опытъ* хотя и очень простой; ибо сущность «опыта» состоитъ именно въ такомъ измѣненіи обстоятельствъ физическаго явленія, при которомъ самое явленіе приобретаетъ доказательную силу. Положимъ прессъ-папье, книги и шерстяную скатерть въ теплую печь и

согрѣемъ ихъ до одной и той же температуры, значительно превышающей температуру рукъ. Шерстяная ска-терть покажется еще сравнительно холодной на ощупь, когда металлическое прессъ-папье уже едва можно бу-детъ держать въ рукѣ. Порядокъ теплаго и холоднаго въ обыденномъ смыслѣ сталъ какъ разъ обратнымъ: и это потому, что теперь рука *получаетъ* теплоту отъ всѣхъ предметовъ, взятыхъ для опыта; она получаетъ ее быстрее отъ тѣхъ предметовъ, которые въ предыду-щемъ случаѣ быстрее ее отнимали. Какъ бы тамъ ни было въ мірѣ нравственномъ, въ физическомъ—способ-ности одного и того же тѣла отдавать и получать всегда въ точности соотвѣтственны и равны.

5. Такимъ образомъ, прямые показанія чувствъ о сравнительной температурѣ разныхъ тѣлъ совершенно обманчивы.

Тиллѣ (во Франціи) и Благденъ и Чэнтрей (въ Англіи) оставались около часу, чувствуя себя очень сносно, въ хлѣбопекарной или скульпторной печи, температура ко-торой была много выше точки кипѣнія воды (въ одномъ случаѣ даже 320°F , т. е. 160°C)—при этой температурѣ бифштексъ изжаривался въ тринадцать минутъ. И между тѣмъ, какъ одежда не причиняла имъ значительнаго не-удобства, они не могли взять въ руки металлическаго пенала безъ того, чтобы не получить серьезнаго обжога.

Съ другой стороны, всѣ металлическіе предметы, ко-торые приходится брать въ руки въ сильные холода полярныхъ экспедицій, должны быть тщательно покрыты пенкой, шерстью или другимъ плохимъ проводникомъ тепла, такъ какъ прикосновеніе къ очень холодному ме-таллу производитъ почти не отличное отъ обжога поврежденіе, хотя причина здѣсь прямо противоположна.

Оба эти явления зависят единственно от сравнительной легкости, с какой теплота проводится металлами.

6. Уже из приведенных обстоятельств читатель не может не заметить, что существует глубокое различие между «теплотой» и «температурой». Теплота, чѣмъ бы она ни была, есть *нѣчто* могущее быть переносимымъ съ одной части матеріи на другую; понятіе же о температурѣ есть исключительно понятіе объ *условіяхъ*, опредѣляющихъ, будетъ или нѣтъ переходъ теплоты, и въ какомъ именно направленіи.

Не боясь сбить учащагося, мы можемъ съ самаго начала сказать, что, съ извѣстной точки зрѣнія, количество теплоты въ тѣлѣ стоитъ въ тѣсной аналогіи съ рабочей силой воды, собранной въ водоемъ или резервуарѣ, тогда какъ температура тѣла подобнымъ же образомъ аналогична высотѣ уровня водоема. Пусть учащійся, однако, не упуститъ изъ виду, что рабочая сила воды не зависитъ только отъ количества жидкости: двигать мельницу вода можетъ лишь въ томъ случаѣ, когда она падаетъ съ извѣстной высоты.

Но въ нѣкоторомъ совершенно иномъ смыслѣ теплота аналогична самой водѣ, а не рабочей силѣ воды. Теплота стремится переходить съ болѣе теплаго тѣла на болѣе холодное, точно такъ, какъ вода стремится течь изъ водоема, стоящаго выше, въ другой, помѣщенный ниже. Такимъ образомъ, по этому свойству, теплота нагрѣтаго тѣла аналогична (или, по крайней мѣрѣ, имѣетъ свойства сходныя) съ водою высокаго уровня и наоборотъ.

Двѣ столь связанныя между собой и однако различные аналогіи могутъ быть безъ опасенія даны учащемуся уже въ началѣ, такъ какъ онѣ, конечно, будутъ

способствовать пониманію дѣла, а самое ихъ различіе побуждаетъ учащемуся быть обитымъ тою или другою ¹⁾).

7. По всему, что мы тотчасъ увидимъ, *теплота—хотя она невещественна — имѣетъ объективное существованіе въ томъ же точно смыслѣ, какъ вещество.*

На первый взглядъ это можетъ показаться парадоксальнымъ; но слѣдуетъ напомнить, что такъ-называемые парадоксы суть лишь необъясненные еще факты, которые именно поэтому стоятъ въ кажущемся несогласіи съ другими, уже понятыми во всемъ ихъ значеніи.

Когда мы утверждаемъ, что матерія имѣетъ объективное существованіе, мы хотимъ сказать, что она есть нѣчто существующее совершенно независимо отъ нашихъ чувствъ и мозговыхъ процессовъ, которыми мы исключительно узнаемъ о ея бытіи. Точное, полное понятіе о матеріи, если бы мы были способны до него достигнуть, было бы, вѣроятно, нѣчто совершенно отличное отъ того представленія о матеріи, которое мы себѣ составляемъ или когда-либо составимъ помощью нашихъ чувствъ; но задача чистой физической науки есть болѣе и болѣе совершенное проникновеніе въ природу и законы внѣшняго міра съ помощью несовершенныхъ средствъ, имѣющихся въ нашемъ распоряженіи. Нашъ разумъ дѣйствуетъ какъ истолкователь и судья; ощущенія же являются лишь свидѣтелями: они могутъ быть болѣе или менѣе ненадежными и неспособными, но тѣмъ не менѣе они для насъ неоцѣнимы, такъ какъ это наши единственные свидѣтели.

8. Не вдаваясь въ дальнѣйшія разсужденія, мы можемъ утвердительно сказать разъ на всегда, что наше

¹⁾ Дальнѣйшія аналогіи находятся въ § 52.

убѣжденіе въ объективности матеріи основано главнымъ образомъ на томъ фактѣ, *открытомъ лишь путемъ опыта*, что мы не можемъ ни въ малѣйшей степени измѣнять ея количество. Мы не въ состояніи ни уничтожить, ни создать самонаимѣйшей частички матеріи. Но разумъ требуетъ послѣдовательности во всѣхъ нашихъ заключеніяхъ, и если мы находимъ въ физическомъ мірѣ еще нѣчто, что не можетъ быть измѣнено въ количествѣ, мы вынуждены признать, что это нѣчто имѣетъ столь же реальное существованіе, какъ и матерія. сколь сильно наши чувства не противодействовали бы такому заключенію. Слѣдовательно, теплота, также какъ и свѣтъ, звукъ, электрическіе токи и т. д., хотя они и не суть формы матеріи, должны считаться столь же реальными, какъ матерія, просто потому, что они представляютъ, какъ то найдено, разныя формы *энергіи* (см. ниже, гл. III); энергія же, при всѣхъ своихъ превращеніяхъ, удовлетворяетъ признаку, который нами принятъ за доказывающій реальность матеріи. Но здѣсь слѣдуетъ еще разъ самымъ настойчивымъ образомъ предупредить учащагося, чтобы онъ отличалъ «теплоту» отъ теплого ощущенія, точно такъ, какъ онъ отличаетъ энергію движенія палки отъ боли, производимой ея ударомъ. Одно есть *вещь*, подлежащая измѣренію, другое — только болѣе или менѣе несовершенный отчетъ или показаніе, даваемое инструментомъ, которымъ мы пробуемъ измѣрить вещь по одному изъ ея дѣйствій.

9. Есть еще одинъ принципъ, который слѣдуетъ выставить, какъ необходимое введеніе ко всякому физическому изслѣдованію—условіе, при которомъ только и возможна физическая наука. Его можно высказать слѣдующимъ образомъ:

При тѣхъ же самыхъ физическихъ условіяхъ, независимо отъ времени и мѣста, происходитъ всегда одинъ и тотъ же физическій результатъ.

Это не требуетъ поясненія, если только употребленныя выраженія вполне поняты и точно истолкованы. Въ самомъ дѣлѣ, это есть лишь утвержденіе (основанное вполне на наблюденіи и опытѣ), что существуютъ опредѣленные и неизмѣнные законы, которымъ подчиняются всѣ физическія явленія.

ГЛАВА II.

Введеніе.

10. Пока мы не достигнемъ того, что всѣ положенія физической науки будутъ не болѣе, какъ безчисленные математическія слѣдствія изъ немногихъ простыхъ законовъ, до тѣхъ поръ невозможно будетъ избѣжать нѣкотораго смѣшенія и повторенія, въ какомъ бы порядкѣ ни излагались учащемуся отдѣльныя части предмета.

Такого смѣшенія не будетъ, если мы ограничимся одной опредѣленной областью, всѣ основныя законы которой могутъ быть ясно формулированы. Здѣсь все въ рукахъ у математика. Здѣсь онъ—свѣдующій строитель со своимъ планомъ и инструментами, которому насильщики подають всѣ необходимыя кирпичи и цементъ. Это давно извѣстно и признано, но едва ли гдѣ-либо выражено яснѣе, чѣмъ въ слѣдующей выдержкѣ:

«То, что собственно называютъ физической наукой, есть знаніе соотношеній между явленіями природы и ихъ физическими основами, въ смыслѣ необходимой связи причинъ и ихъ слѣдствій; соотношенія эти изслѣ-

дуются при помощи математики, т. е. такого метода, въ которомъ посредствомъ употребленія условныхъ символовъ—процессамъ разсужденія, въ вопросахъ, приводимыхъ къ категоріямъ *количества и пространственныхъ условий*, придана совершенная точность, простота и способность къ обширнѣйшимъ приложеніямъ въ почти непонятной для непосвященнаго степени. Эта область знанія доступна лишь тому, кто владѣетъ математикой. Но есть еще низшій отдѣлъ науки о природѣ, весьма важный, какъ подготовительный и вспомогательный, который можно назвать научной феноменологіей; его дѣло наблюдать и классифицировать явленія и заключать путемъ индукціи о законахъ, ими управляющихъ. Но научная феноменологія не способна выводить эти законы, какъ необходимыя проявленія физическихъ силъ и потому остается чисто эмпирической, пока ея данныя не будутъ истолкованы высшей наукою. Низшая, вспомогательная наука въ послѣднее время, однако, заняла совсѣмъ не подобающее ей положеніе. Она разыгрываетъ ихъ себя хозяйку вмѣсто того, чтобы быть прислугой, и часто скрываетъ свое безсиліе и недостатокъ научной чистоты въ звонкихъ фразахъ о тайнахъ природы. Она даже укоряетъ истинную науку, познаніе причинъ явленій, въ чистомъ механизмѣ. Она надѣляется матерію таинственными свойствами и скрытыми силами и думаетъ найти въ физическомъ атомѣ зачатокъ и разгадку всей земной жизни» *).

Всякій сколько-нибудь знакомый съ предметомъ знаетъ, что законы движенія и законъ тяготѣнія составляютъ всю *физическую астрономію* въ томъ смыслѣ, въ кото-

*) Church, *Quarterly Review*, April 1876, p. 149.

ромъ этотъ терминъ обыкновенно употребляется:—изслѣдованіе движеній и взаимныхъ возмущеній нѣкотораго числа массъ (обыкновенно принимаемыхъ за точки или, по крайней мѣрѣ, за совершенно твердыя тѣла), составляющихъ какую-либо систему изъ солнца, планетъ и спутниковъ.

Но лишь только физика укажетъ намъ, что мы *должны* принять въ расчетъ упругость и пластичность каждой ихъ массъ системы, количество и распребленіе жидкости на поверхности массы, возможность магнитныхъ и другихъ дѣйствій между массами, наконецъ, сопротивленіе среды, въ которой онѣ движутся, — простота данныхъ математической задачи исчезаетъ, и физическая астрономія, за исключеніемъ наиболѣе общихъ основаній, становится столь же запутанной, какъ любая другая отрасль науки.

То же самое—съ динамикой ¹⁾ твердыхъ тѣлъ и жидкостей: пока мы довольствуемся тѣмъ, что считаемъ твердыя тѣла совершенно гладкими и абсолютно твердыми, а жидкости несжимаемыми и необладающими внутреннимъ треніемъ, до тѣхъ поръ трудности динамики, хотя иногда и огромныя, являются чисто математическими трудностями; предметъ естественнымъ образомъ дѣлится на отдѣльныя главы, и классификація его разнообразныхъ задачъ сравнительно проста. Но лишь только вводятся понятія о деформаціи въ твердыхъ тѣлахъ и о внутреннемъ треніи жидкостей, съ развитіемъ теплоты, какъ слѣдствіемъ.—тотчасъ получается путаница вслѣдствіе несовершенной или невозможной клас-

¹⁾ Подъ динамикой англичане разумѣютъ то, что у насъ называютъ механикой—науку о силахъ. *Зам. р. перев.*

сификации. Каждая задача уже не может быть разсматриваема сама по себе: для ея рѣшенія приходится приобѣгать, и не разъ, къ заимствованіямъ изъ другихъ вопросовъ науки; и единственный способъ вполнѣ и безъ усложненій овладѣть предметомъ (еслибъ вообще такой способъ быть мыслимъ) состоялъ бы въ *обработкѣ всего сразу*.

11. Такимъ образомъ, при изложеніи общаго ученія о теплотѣ мы увидимъ невозможность провести опредѣленныя пограничныя линіи. Какъ бы мы ни подраздѣляли предметъ, всегда окажется, что каждая часть для своего развитія потребууетъ заимствованія чего-либо отъ другой.

Все, что мы можемъ сдѣлать въ этихъ условіяхъ (которыя просто означаютъ то, что наши свѣдѣнія относительно теплоты еще не такъ полны, какъ знанія законовъ движенія и тяготѣнія) это—сознательно сдѣлать классификацію нѣсколько неопредѣленной и свободно пользоваться, по скольку нужно, результатами изъ другихъ частей предмета, еще не разсмотрѣнныхъ нами. Выгоды такого приѣма, по крайней мѣрѣ судя по моему личному опыту, значительно превышаютъ его очевидные, но пока еще неустранимые недостатки. Чтобы, однако, по возможности, ослабить послѣдніе, я сдѣлаю сперва краткій общій очеркъ предмета, дабы намѣтить главные черты и ихъ соотношенія, дамъ *объясненіе* важнѣйшаго, не приводя опытныхъ доказательствъ. Такимъ образомъ, учащійся съ самаго начала будетъ хорошо подготовленъ къ изученію каждаго изъ подраздѣленій предмета съ тою подробностью, которая совместна съ элементарнымъ сочиненіемъ. Другая выгода состоятъ въ томъ, что подобный бѣглый и общій обзоръ предмета допускаетъ нѣко-

торыя полезныя и даже необходимыя уклоненія, которыя могли бы серьезно мѣшать цѣльности болѣе подробныхъ и опредѣленныхъ отдѣловъ сочиненія.

12. Я нахожу наиболѣе удобною слѣдующую классификацію:

1. Природа теплоты.
2. Дѣйствія теплоты.
3. Измѣреніе теплоты и температуры.
4. Источники теплоты.
5. Передача теплоты.
6. Превращенія теплоты.

Какъ уже указано, здѣсь нѣтъ опредѣленныхъ пограничныхъ линій между каждымъ двумя отдѣлами: объясненіе многихъ даже самыхъ обыкновенныхъ явленій относится по частямъ къ болѣе нежели одному отдѣлу.

Нелишне, однако, замѣтить, что существуетъ очень тѣсная связь между тремя изъ поименованныхъ отдѣловъ, (1), (4) и (6), которые вмѣстѣ содержатъ главные новѣйшіе успѣхи *динамической теоріи теплоты*, или *термодинамики*, какъ ее обыкновенно называютъ. Поэтому (1) будетъ подробнѣе развитъ въ нашемъ бѣгломъ обзорѣ всего предмета, а дальнѣйшее развитіе этого отдѣла войдетъ въ составъ (4) и (6), которые поэтому удобнѣе будетъ изучать совмѣстно. Далѣе, (3) зависитъ, по крайней мѣрѣ въ обыкновенныхъ практическихъ формахъ, отъ нѣкоторыхъ приложеній (2) отдѣла. Отдѣлъ (5) стоитъ въ значительной мѣрѣ особнякомъ, но естественно дѣлится на три части соответственно тремъ различнымъ процессамъ, которые всѣ имѣютъ большое научное, какъ и практическое значеніе.

ГЛАВА III.

О силѣ и энергіи.

13. Намъ предстоитъ теперь вкратцѣ пройти по порядку названные отдѣлы нашего предмета; но для ясности намъ необходимо нѣкоторое отклоненіе къ элементамъ *динамики*. Для этого потребуется привести и объяснить одно мѣсто изъ *Principia* Ньютона, которое до самаго послѣдняго времени повидимому совсѣмъ ускользало отъ вниманія ученыхъ. Читатель увидитъ, что разсмотрѣніе этого мѣста, особенно если онъ встрѣтитъ его выраженнымъ современной научной рѣчью, много облегчитъ его дальнѣйшій успѣхъ въ пониманіи природы теплоты.

Ньютоновъ *третій законъ движенія* гласитъ:

«Всякому дѣйствию есть всегда равное и противоположное противодѣйствіе; или дѣйствія какихъ-либо двухъ тѣлъ другъ на друга всегда равны и имѣютъ прямо противоположныя направленія».

Ньютонъ показываетъ сперва приѣмность этого закона къ обыкновеннымъ давленіямъ, натяженіямъ, притяженіямъ и т. д., т. е. къ тому, что мы обык-

новенно называемъ *силами*, дѣйствующими между двумя тѣлами, а также къ удару и импульсу, которые суть лишь интегралы произведеній силы на элементъ времени.

Но далѣе Ньютонъ приводитъ, что тотъ же самый законъ справедливъ еще въ другомъ, высшемъ смыслѣ. Онъ говоритъ:

«Если дѣйствіе какого-либо дѣятеля будемъ измѣрять его силою, умноженной на скорость и если подобнымъ же образомъ противодѣйствіе сопротивленія будемъ измѣрять скоростями различныхъ его частей, умноженными на соответственныя силы, — происходятъ ли эти силы отъ тренія, сирѣнція, вѣса или ускоренія, — то дѣйствіе и противодѣйствіе во всякъ сочетаніяхъ машинъ будутъ равны и противоположны».

Дѣйствіе и противодѣйствіе, равенство которыхъ здѣсь утверждается, не суть болѣе простыя силы, но произведеніе изъ силъ на скорость — то, что нынѣ называется *величиною работы въ единицу времени* (Rates of doing Work). Это есть приращеніе, отнесенное ко времени, или приращеніе въ единицу времени, чего то весьма ошутимаго и реальнаго, что измѣряется введенной Уаттомъ практической единицей, *лошадиной силой*, т. е. величиной работы, которая производится поднятіемъ 33000 фунтовъ на одинъ футъ въ теченіе минуты противъ земного тяготѣнія ¹⁾.

14. Теперь подумаемъ о различіи между поднятіемъ груза въ одинъ центнеръ и попыткой поднять одну

¹⁾ Это англійская (уаттовская) лошадиная сила. У насъ принята французская: работа поднятія 75 килгр. на одинъ метръ въ теченіе секунды, или 75 килограмметровъ въ секунду. Французская лошадиная сила немного менѣе (0,986) англійской.

тонну. При нѣкоторомъ усиліи мы поднимаемъ центнеръ на нѣсколько футовъ и можемъ воспользоваться *опусканіемъ груза для приведенія въ движеніе машины или для какой-либо работы иного рода*. Но при всѣхъ стараніяхъ намъ не удастся поднять груза въ одну тонну; и, слѣдовательно, несмотря на все наше напряженіе, мы не въ состояніи будемъ произвести работы при опусканіи груза.

Въ обоихъ случаяхъ оправдывается первая формулировка *третьяго закона Ньютона*. Съ какой силой мы тянемъ массу, съ такой же точно силой она намъ противодействуетъ. Но вторая формулировка не приложима къ случаю тонны, потому что *грузъ здѣсь не приобретаетъ скорости*: онъ остается неподвижнымъ. Поэтому, такъ какъ на него не было затрачено работы, онъ и не приобретаетъ способности производить работы. Съ другой стороны, грузъ въ одинъ центнеръ былъ приведенъ въ движеніе, на него затрачена работа, и эта работа занесена въ немъ въ его возвышенномъ положеніи: запасъ можетъ быть употребленъ во всякое послѣдующее время. По смыслу закона Ньютона, работа, затраченная въ этомъ случаѣ на поднятіе центнера, остается запасенной (безъ измѣненія ея величины) въ поднятой массѣ.

15. Оказывается такимъ образомъ, что *сила* есть лишь одно названіе; между тѣмъ какъ произведеніе силы на перемѣщеніе точки ея приложенія имѣетъ объективное существованіе. (Тѣ, которые настолько проникнуты метафизикой, что не согласны допустить, чтобы произведеніе *одного лишь названія* на перемѣщеніе могло имѣть объективное бытіе, признають, можетъ быть, что частное изъ лошадиной силы на скорость не можетъ быть ничѣмъ инымъ, какъ названіемъ). Въ самомъ дѣлѣ, соврѣ-

менная наука показываетъ намъ, что «сила» есть лишь условный терминъ, употребляемый нынѣ (и съ большою пользою) для сокращенія того, что иначе повлекло бы къ запутаннымъ выраженіямъ. Но ее отнюдь нельзя разсматривать, какъ вещь; точно такъ, какъ размѣръ *банковаго процента* не есть денежная сумма, или какъ процентное число рожденій въ странѣ не означаетъ дѣйствительнаго числа дѣтей, родившихся въ году. И весьма простая математическая операція показываетъ намъ, что все равно—сказать:

Работа—въ лошадиныхъ силахъ—какого либо двигателя въ секунду есть произведеніе силы на среднюю скорость;

или сказать:

*Сила есть величина работы на единицу протяженія *).*

16. Въ только-что приведенной иллюстраціи словъ Ньютона сопротивленіе было *всѣмъ* центнера или тонны. Когда сопротивленіе было преодолено, произведена была работа, которая запасена въ поднятой массѣ; въ формѣ, допускающей пользоваться ею когда угодно.

Слѣдующая мысль, поданной Юнгомъ, мы употребляемъ нынѣ слово *энергія* для обозначенія способности производить работу, *въ чемъ бы ни состояла* эта способность. Такъ мы говоримъ, что поднятая масса, вслѣд-

*) Символически это будетъ:

$$\frac{dw}{dt} = f \cdot v = f \cdot \frac{dx}{dt} \text{ для перваго положенія,}$$

и

$$\frac{dw}{dx} = f \text{ для втораго.}$$

(*w* — работа, *x* — протяженіе).

ствіе своего возвышеннаго положенія, обладает запасомъ энергій, равнымъ затраченной при ея поднятіи работѣ. Эта скрытая или пассивная форма называется *потенціальной энергіей*. Прекрасные примѣры потенциальной энергій представляютъ: вода возвышеннаго уровня, которая можетъ, падая, двигать машину; поднятая часовая гиря, которая, опускаясь, заставляетъ часы идти цѣлую недѣлю; порохъ, въ которомъ химическое притяженіе составныхъ частей приводится въ дѣятельность посредствомъ искры, и т. д. и т. д.

Еще примѣръ намѣчается въ Ньютоновомъ положеніи (§ 13) словомъ «сдѣпленіе», которое надо понимать включающимъ вообще всѣ такъ-называемыя молекулярныя силы, какъ напримѣръ тѣ, отъ которыхъ зависитъ упругость твердаго тѣла.

Натягивая тетиву лука, мы затрачиваемъ работу, потому что дѣйствующая сила производитъ скорость; и натянутая тетива (подобно поднятой гирѣ) обладаетъ потенциальной энергіей, эквивалентной затраченной работѣ. Эта энергія, въ свою очередь, можетъ быть передана стрѣлѣ; и *что потомъ?*

17. Возвращаясь къ словамъ Ньютона (§ 13), мы видимъ, что онъ говоритъ объ одной формѣ сопротивленія, происходящей отъ «ускоренія». Въ самомъ дѣлѣ, стрѣла, по инерціи, сопротивляется приведенію ея въ движеніе; чтобы заставить ее двигаться, нужно затратить работу:—но эта работа находится въ запасѣ въ движущейся стрѣлѣ вслѣдствіе ея движенія. Изъ приведенныхъ выше положеній Ньютона выходитъ, что мѣра работы, которую нужно затратить, чтобы произвести ускореніе *), есть *произведеніе изъ количества движенія*

*) Пусть масса M имѣетъ скорость v и ускореніе въ напра-

на ускореніе въ направленіи пути, а порожденная энергія измѣряется половиною произведенія изъ массы на квадратъ приобретенной ею скорости. Эта активная форма называется *кинетической энергіей*.

Примѣрами обыкновенной кинетической энергіи или же смѣшанной, кинетической и потенціальной, намъ послужать: водяной потокъ, способный двигать подливное колесо; вѣтеръ, которымъ тоже можно приводить въ движеніе машины; энергія водяныхъ или звуковыхъ волнъ; лучистая энергія, посылаемая намъ солнцемъ,—возбуждаетъ ли она нервы осязанія или зрѣнія (ее называютъ лучистой теплою въ первомъ случаѣ и свѣтомъ во второмъ), или производитъ химическія разложенія, какъ на примѣръ углекислаго газа и воды въ листьяхъ растений, или серебряныхъ солей въ фотографіи (въ этомъ случаѣ она носитъ названіе *актинической энергіи*); энергія движенія частичекъ газа, отъ которой зависитъ его давленіе, и т. д. (Въ волнообразномъ движеніи энергія обыкновенно бываетъ частью потенціальная, частью кинетическая).

18. Послѣ этихъ предварительныхъ объясненій и опредѣленій мы можемъ слѣдующимъ образомъ передать слова Ньютона (безъ измѣненія ихъ смысла) языкомъ современной науки:

вленіи движенія $\dot{v}$. Тогда Ньютоново выраженіе для мѣры работы, затрачиваемой на ускореніе, есть $Mv \cdot v$, а вся работа, которая расходуется на сообщеніе скорости v массѣ M , находящейся въ покоѣ, есть $\frac{1}{2} M v^2$.

(По *флюкціонному* обозначенію Ньютона, $\dot{v}$ означаетъ производную скорости по времени, т. е. то, что мы обыкновенно выражаемъ символомъ $\frac{dv}{dt}$. Замѣч. р. *перев.*).

Работъ, производимой надъ какою-либо системой тѣла (у Ньютона—части машины), соответствуетъ равная ей работа, совершаемая противъ тренія, молекулярныхъ силъ или тяготѣнія, если нѣтъ ускоренія; если же есть ускореніе, часть работы расходуется на то, чтобы преодолѣть сопротивленіе движимаго тѣла приобритенію ускоренія, и порождаемая такимъ образомъ прибавочная кинетическая энергія эквивалентна затраченной на то работѣ.

Но мы уже видѣли, что когда работа расходуется противъ молекулярныхъ силъ, какъ при натягиваніи лука или закручиванія пружины,—она запасается въ формѣ потенціальной энергіи. Въ подобной же формѣ она запасается также и при работѣ противъ тяготѣнія, напр. при поднятіи груза.

Отсюда выходитъ, въ смыслѣ Ньютона, что когда расходуется работа, она всегда запасается въ формѣ или потенціальной, или кинетической энергіи, исключая, можетъ быть, того случая, когда работа производится противъ тренія, о судьбѣ которой Ньютонъ не даетъ намъ указанія. Итакъ, Ньютонъ говоритъ утвердительно, что (за исключеніемъ развѣ случая тренія) *энергія неуничтожаема*: она превращается изъ одной формы въ другую, но никогда не кѣмѣняется въ количествѣ. Дабы завершить это великое положеніе, остается еще узнать, *что дѣлается съ работой, производимой противъ тренія.*

19. Здѣсь, конечно, нуженъ опытъ. Къ несчастію, Ньютонъ повидимому забылъ, что этотъ опытъ издавна производится дикими, когда имъ надо добыть огня. Всѣмъ дикимъ племенамъ извѣстно, что терпѣливымъ треніемъ двухъ сухихъ палокъ, или (еще лучше) сверленіемъ куска мягкаго дерева посредствомъ куска твердаго съ слегка

притупленнымъ концомъ можно зажечь оба куска дерева. Здѣсь несомѣнно производится теплота, но она *производится затратою работы*. И въ самомъ дѣлѣ, затраченная противъ тренія работа возмѣщается эквивалентнымъ количествомъ произведенной теплоты. Это было просмотрѣно Ньютономъ, и такимъ образомъ его великое обобщеніе осталось, хотя и въ одномъ лишь пунктѣ, неполнымъ. Обратное превращеніе—теплоты въ работу—извѣстно было, по крайней мѣрѣ, уже со времени Герона. Но знать, что извѣстный процессъ даетъ извѣстный результатъ, не значитъ еще знать, «почему» такъ происходитъ; и Геронъ столь же мало подозрѣвалъ, что въ своемъ эолипилѣ онъ *превращалъ* теплоту въ работу, какъ дикіе — что работа можетъ быть превращена въ теплоту.

Румфордъ и Дэви, въ исходѣ прошлаго столѣтія, совершенно разными опытными процессами показали рѣшительно, что матеріальность теплоты не можетъ быть поддерживаема, и тѣмъ самымъ дали средство пополнить Ньютоново положеніе.

20. Частный случай сохраненія энергіи былъ высказанъ еще задолго до Ньютона утвержденіемъ невозможности «вѣчнаго движенія» (*perpetuum mobile*). Это было положено еще Стевинусомъ въ основаніе статики. Въ 1775 г. французская академія наукъ рѣшила не разсматривать никакихъ проектовъ, претендующихъ создавать работу безъ соотвѣтственной и эквивалентной траты. Много было сдѣлано опытовъ нѣкоторыми изъ остроумнѣйшихъ людей всѣхъ временъ для созданія «вѣчнаго движенія», и ихъ полный всегдашній неуспѣхъ можетъ считаться доказательствомъ невозможности задачи. На ея признанной невозможности основанъ способъ заклю-

ченія, который мы объяснимъ здѣсь на одномъ частномъ примѣрѣ, такъ какъ это очень пригодится въ нѣкоторыхъ болѣе теоретическихъ частяхъ нашего предмета.

Мы покажемъ именно, что во всѣхъ случаяхъ проявленія законовъ природы, какъ напр. всемірнаготяготѣнія и магнитнаго притяженія, работа, затраченная для перемѣщенія тѣла по извѣстному пути въ одномъ направленіи, въ точности возмѣщается при возвращеніи тѣла въ прежнее положеніе, не только по прежнему, но и по любому другому пути: предполагается, что всякое треніе при этомъ отсутствуетъ. Положимъ, что мы имѣемъ два пути отъ A къ B и что по одному изъ нихъ мы затра-

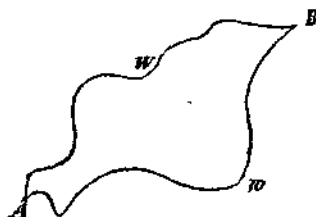


Рис. 1.

чивали бы на данную массу больше работы, чѣмъ по другому. Пусть обѣ работы будутъ W и w . Въ такомъ случаѣ можно было бы имѣть «вѣчное движеніе». Заставимъ массу перемѣщаться безъ тренія такъ, чтобы во время подъема она двигалась по пути AB , а при опусканіи по BWA . Отъ A къ B количество w работы затрачивается противъ силъ системы; отъ B къ A эти силы доставляютъ работу W . Въ цѣломъ, послѣ полного оборота, масса возвращается въ A съ избыткомъ энергіи $W-w$ противъ первоначальнаго. Каждый разъ, какъ масса дѣлаетъ полный оборотъ по этому двойному пути по

одному и тому же направленію, она пріобрѣтаетъ въ энергіи избытокъ между большимъ и меньшимъ количествами, и слѣдовательно подѣ конецъ каждаго оборота этотъ избытокъ можно было бы употребить на движеніе какой-нибудь машины—на полезную работу.

Мы принимаемъ здѣсь, что затраченная по одному направленію работа въ точности возмѣщается, когда заставляютъ тѣло возвращаться по тому же пути; другими словами, что дѣйствіе *обратимо*. Это выраженіе будетъ подробнѣе разобрано позже.

Вообще, если бы можно было однимъ путемъ произвести извѣстное дѣйствіе съ меньшей затратой, чѣмъ другимъ, и если бы болѣе невыгодная операція была обратима, то можно бы создать неограниченное количество полезной работы изъ ничего.

Теперь мы подготовлены къ краткому общему обзору нашего предмета по предположенному въ § 11 плану.

ГЛАВА IV.

Предварительный очеркъ предмета.

21. **Природа теплоты.** Въ древности теплоту, подъ именемъ огня, считали одною изъ четырехъ стихій, полагая, что всякій предметъ физическаго міра необходимо долженъ состоять или изъ всѣхъ, или изъ нѣкоторыхъ стихій; но подъ огнемъ разумѣли какъ обыкновенный огонь, такъ повидимому и все то, что дѣйствительно или внѣшнимъ образомъ было огненной природы, напримѣръ, солнце и луну, звѣзды, планеты и кометы, молнію и сѣверное сіяніе, и т. п.

Опытная наука, которой Джильбертъ изъ Кольчестера (около 1570 г.) является первымъ двигателемъ, если не основателемъ, на первыхъ порахъ стремилась разсматривать теплоту, свѣтъ, электричество и т. д., какъ формы матеріи—матеріи чрезвычайно тонкой, способной легко проникать обыкновенное грубое вещество и соединяться съ нимъ. Формы этой матеріи классифицировались подъ именемъ *несъсложныхъ* началъ (*improdeabilia*), потому что нагрѣтое или наэлектризованное тѣло, напримѣръ, не становилось тяжелѣе отъ теплоты

или электричества, которыми, какъ полагали, оно питывается.

22. Въ этомъ смыслѣ теплота являлась чрезвычайно легкимъ видомъ матеріи и называлась *теплородомъ* (*caloricum*) или въ извѣстныхъ своихъ проявленіяхъ (особенно въ нѣкоторыхъ химическихъ процессахъ) *флогистономъ*,—хотя, какъ было показано въ недавнее время *) последнее слово употребляемо было и для обозначенія извѣстныхъ формъ того, что мы нынѣ называемъ химической потенціальной энергіей. (Смыслъ этого выраженія будетъ ясенъ изъ сказаннаго въ § 16 объ энергіи пороха).

Вѣра въ матеріальность теплоты, или въ теплородъ, вопреки опытамъ, доказывавшимъ противное, и различнымъ остроумнымъ догадкамъ **) объ ея истинной при-

*) Crum Brown, *Proc. R. S. E.*, 1870.

**) «Опыты показали мнѣ, что есть жидкости, къ которымъ простое примѣшиваніе молока, масла или другихъ жидкостей—даже холодной воды—производить значительную теплоту. Я иногда употреблялъ растворитель (*menstruum*), въ который было брошено лишь немного мяса; тогда, хотя и не было видимаго кипѣнія, происходило въ нѣсколько минутъ разогрѣваніе настолько сильное, что сосудъ трудно было держать въ рукѣ. Но, кажется, это не нужно непременно приписывать настоящему броженію; это скорѣе можетъ быть слѣдствіемъ возмущеннаго движенія частичекъ (*corpuscles*) растворителя, выводимыхъ прибавляемой жидкостью или другимъ тѣломъ изъ обычнаго ихъ движенія въ неправильное: отсюда оживленное и спутанное движеніе малыхъ частичекъ, изъ которыхъ составленъ растворитель; и въ такомъ возмущенномъ состояніи (отъ какой бы причины оно ни происходило) повидимому состоитъ главнымъ образомъ сущность теплоты». *Some Considerations touching the Usefulness of Experimental Naturall Philosophy* (Нѣкоторыя соображенія касательно пользы экспериментальной натуральной философіи) By Robert Boyle. Part. II, Section I, p. 45 (1663).

родѣ, принималась и проповѣдывалась всѣми почти до 1840 года. Только съ этого времени начался тотъ быстрый переворотъ, который совершенно преобразилъ общепринятые взгляды на теплоту, точно такъ, какъ нѣсколькими годами раньше былъ нанесенъ, можно сказать, смертельный ударъ *материальной, или корпускулярной теоріи свѣта*; или, какъ въ болѣе недавнее время, *электрическія жидкости* были изгнаны изъ всей британской науки, за исключеніемъ развѣ нѣкоторыхъ изъ тѣхъ болѣе чѣмъ бесполезныхъ сочиненій, которыя обыкновенно называются *популярными*.

23. Одно за другимъ всѣ «невѣсомыя» были сбиты съ ихъ прежней гордой позиціи въ наукѣ; но борьба была трудною, и во многихъ континентальныхъ школахъ физиковъ, въ особенности германскихъ, электрическія жидкости и до сихъ поръ еще сохранили свое положеніе, благодаря крайне остроумной идеѣ В. Вебера, въ своемъ родѣ столь же замѣчательной, какъ Ньютоновскіе *приступы легкаго отраженія и прохожденія*. Эти жидкости считаются и нынѣ формами невѣсомой матеріи, и взаимное ихъ дѣйствіе подчиняется особенному закону, совершенно отличному отъ всего извѣстнаго въ другихъ отрасляхъ физики. Но и здѣсь скоро долженъ наступить конецъ, когда послѣдніе слѣды невѣсомыхъ началъ будутъ сданы на храненіе въ архивы науки.

24. Опыты, которые, какъ сказано въ § 22, впервые доказали нематериальность теплоты, принадлежать Румфорду и Дэви и относятся къ 1798 и 1799 годамъ.

Развитіе теплоты при треніи объяснялось тѣми, которые принимали теплоту за вещество, слѣдующимъ образомъ. Тѣло въ плотномъ, или лучше сказать, массивномъ видѣ, когда оно еще не превращено въ стружки,

содержитъ при нѣкоторой опредѣленной температурѣ опредѣленное количество теплоты. Оно имѣетъ, какъ говорили, извѣстную тепловую *емкость*; другими словами, оно требуетъ извѣстнаго количества теплоты, примѣшаннаго къ его частицамъ, для того, чтобы температура его была именно тою, которая наблюдается. Но если бы мы могли увеличить тепловую емкость тѣла, то оно могло бы содержать больше теплоты, не повышаясь въ температурѣ. Съ другой стороны, если бы какимъ-либо путемъ мы могли уменьшить его теплоемкость, то оно необходимо сдѣлалось бы теплѣе и даже передало бы часть своего тепла окружающимъ тѣламъ. Такимъ образомъ, согласно объясненію сторонниковъ этой теоріи, развитіе теплоты при треніи и скобленіи обуславливается тѣмъ, что мы уменьшаемъ теплоемкость тѣла, когда превращаемъ его въ порошокъ. Ибо, при уменьшеніи теплоемкости, тѣло должно отдать часть содержащейся въ немъ теплоты; если же оно ее удержитъ, то тепловой эффектъ необходимо выразится въ немъ сильнѣе, чѣмъ прежде: температура тѣла повысится. Все разсужденіе совершенно логично, и противъ него, какъ способа разсужденія, ничего нельзя сказать; но оно содержитъ то ложное допущеніе, что теплота есть вещество и, слѣдовательно, неуничтожаема.

25. Теперь посмотрите, какъ хорошо Румфордъ взялся за этотъ вопросъ и какъ онъ старается разрѣшить опытами, насколько это возможно, свои сомнѣнія касательно природы теплоты. Онъ говоритъ:

„Есть это такъ, то, по современнымъ ученіямъ о скрытой теплотѣ и о теплородѣ, *теплоемкость* частей металла, превращеннаго въ стружку, не только должна измѣниться, но измѣненіе должно быть достаточно велико для объясненія всей произведенной теплоты“.

Румфордъ—по скольку его форма опыта была доказательна — не нашелъ разницы между теплоемкостями раздробленнаго металла и того же металла до раздробленія. Такимъ образомъ, если бы только этотъ опытъ былъ удовлетворителенъ—а Румфордъ не видѣлъ способа сдѣлать его вполне удовлетворительнымъ—то фактъ нематеріальности теплоты былъ бы рѣшительно установленъ еще въ 1798 г. Недостатокъ изслѣдованій Румфорда состоялъ именно въ томъ, что имъ не были приняты мѣры къ приведенію какъ измелченнаго металла, такъ и сплошнаго, если возможно, къ совершенно одинаковому конечному состоянію. Румфордъ пробовалъ достигнуть этого, бросая металлы въ воду — одинаковыя массы металла въ кускахъ и въ стружкахъ, нагрѣтыя до одной и той же температуры, въ одинаковыя количества воды при одной и той же низкой температурѣ—чтобы видѣть, произведутъ-ли онѣ разныя измѣненія температуры, каждая въ своемъ сосудѣ съ водой.

26. Но объ массы металла не были въ одинаковомъ конечномъ состояніи. Стружки не находились въ томъ же самомъ состояніи, какъ сплошной металлъ; онѣ могли претерпѣть значительное сжатіе или измѣненіе въ формѣ, вслѣдствіе чего могли содержать нѣкоторое количество скрытой теплоты, которое Румфордъ не открылъ бы своимъ способомъ. Простѣйшій извѣстный намъ правильный способъ полнаго рѣшенія задачи—которая и была для Румфорда единственной трудностью—мы имѣемъ въ химическомъ процессѣ. Растворимъ куски и одинаковый вѣсъ стружекъ въ равныхъ количествахъ какой-либо кислоты. Подъ конецъ процесса—въ этомъ, конечно, не можетъ быть никакого сомнѣнія—мы будемъ имѣть совершенно одинаковыя вещества, исходимъ-ли мы отъ сплош-

ныхъ кусковъ или отъ стружекъ. Если есть какая-нибудь таинственная разница въ теплостности тѣхъ и другихъ, то она должна выказаться во время процесса растворенія. При раствореніи металла въ кислотѣ вообще происходитъ развитіе теплоты; если бы была разница въ количествахъ теплоты, которыя содержатся въ кускахъ и стружкахъ одинаковаго вѣса при одной и той же температурѣ—другими словами, если бы теплота была нѣкоторымъ образомъ матеріей,—то развитіе теплоты необходимо было бы больше въ одномъ сосудѣ, чѣмъ въ другомъ. Сдѣлай Румфордъ этотъ единственный дополнительный опытъ—и честь доказательства нематеріальности теплоты осталась бы за нимъ однимъ.

27. Румфордъ нашелъ, что, несмотря на неизбежную потерю теплоты въ его испытаніяхъ (которыя состояли въ сверленіи пушки тупымъ сверломъ), работа одной лошади въ теченіе двухъ часовъ двадцати минутъ была достаточна, чтобы нагрѣть до точки кипѣнія около девятнадцати фунтовъ (8,62 килогр.) воды, кромѣ самой пушки и всѣхъ примѣнявшихся машинъ. Вотъ его заключеніе:

„Размышляя объ этомъ предметѣ, не забудемъ обратить вниманіе на замѣчательное обстоятельство, что источникъ теплоты, развиваемой треніемъ, при этихъ опытахъ, былъ повидному *нестощимъ*."

„Едва-ли можно прибавлять, что то, что можетъ быть поставлено *уединеннымъ тѣломъ* или уединенною системою тѣлъ *безгранично*, не можетъ быть *матеріальнымъ началомъ*. Мнѣ кажется весьма труднымъ, если не совершенно невозможнымъ, составить себѣ какое-нибудь определенное понятіе о томъ, что возбуждается и передается такимъ образомъ, какъ возбуждается и передается въ этихъ опытахъ теплота, если не признать, что это—*движеніе*“.

28. Если мы сделаемъ расчетъ на основаніи данныхъ записки Румфорда, то мы найдемъ—считая теплоту формою энергіи и принимая работу одной лошади въ минуту за 30000 футофунтовъ—что механическій эквивалентъ теплоты есть 940 футофунтовъ. Это означаетъ, что если бы мы употребили все количество работы, выражаемое 940 футофунтами, для переѣшиванія одного только фунта воды, этотъ фунтъ воды подъ конецъ операціи былъ бы на 1° Фарнгейта теплѣе, чѣмъ въ началѣ. Мы выразимъ то же въ иной формѣ, можетъ быть, еще болѣе наглядной. При паденіи водопада съ высоты 940 футовъ, сила тяжести производитъ работу въ 940 футофунтовъ на каждый фунтъ воды: и, слѣдовательно, если бы вся энергія, которою обладаетъ движущаяся вода при достиженіи основанія водопада, была потрачена только на нагрѣваніе воды, результатъ былъ бы тотъ, что вода у основанія была бы на 1°F теплѣе, чѣмъ на вершинѣ ¹⁾.

¹⁾ Для перечисленія на метрическія мѣры мы имѣемъ:

1 градусъ $F = \frac{5}{9}$ град. С. (см. § 132).

1 англ. фунтъ = 0,4536 килогр. } (см. § 347).

1 англ. футъ = 0,3048 метра. }

Отсюда:

1 футофунтъ = $0,4536 \times 0,3048$ килограмметра.

Если 940 футофунтовъ нагрѣваютъ одинъ фунтъ воды на 1°F , то необходимо

$940 \times (0,4536 \times 0,3048) \times \frac{9}{5}$ килограмметровъ,

чтобы нагрѣть 1 фунтъ воды на 1°C . Для нагрѣванія же 1 килогр. воды на 1°C нужно будетъ затратить

$[940 \times (0,4536 \times 0,3048) \times \frac{9}{5}] : 0,4536 = 515,7$ килограмметра.

Итакъ, въ приведенномъ выше примѣрѣ, водопадъ долженъ имѣть высоту въ 516 метровъ, чтобы вода при основаніи была на 1°C теплѣе, чѣмъ при вершинѣ.

29. Дэви показалъ впервые, что треніемъ двухъ кусковъ льда другъ о друга — простой затратой работы на треніе кусковъ—ихъ можно расплавить. Сторонникъ теплородной теоріи, однако, рассуждалъ бы такъ: два куска льда при треніи не могутъ расплавить другъ друга, потому что для расплавленія нужно сообщить имъ теплоту. Но если теплота можетъ взятыся при треніи только отъ нихъ самихъ, если она не можетъ перейти отъ сосѣднихъ тѣлъ, куски льда не могутъ расплавиться, — такъ какъ для расплавленія они должны были бы сперва отдать другъ другу часть своей теплоты.

Поэтому противъ опыта Дэви, рѣшавшаго вопросъ, повидимому, противъ теоріи теплорода, можно было возразить, что теплота могла взятыся изъ какихъ-нибудь вѣншнихъ источниковъ. Но Дэви сдѣлалъ опытъ и въ другой формѣ. Онъ подвергъ тренію два куска металла, окруживъ ихъ льдомъ и помѣстивъ въ сосудъ, изъ котораго былъ выкаченъ воздухъ, дабы удалить всякія мѣшающія опыту обстоятельства, всякую причину къ сомнѣнію; и онъ опять нашелъ, что куски металла при треніи производили теплоту и плавили ледъ, хотя и были приняты всѣ мѣры къ тому, чтобы воспрепятствовать теплотѣ притекать откуда-либо извнѣ.

30. Любопытно, что его заключенія по этому поводу крайне нерѣшительны, хотя опыты сами по себѣ вполне рѣшаютъ вопросъ. Онъ говоритъ:

„Изъ этихъ опытовъ ясно, что ледъ отъ тренія превращается въ воду и, согласно принятому взгляду, его емкость уменьшается; но хорошо извѣстенъ фактъ, что теплоемкость воды гораздо больше, чѣмъ льда; ледъ требуетъ прибавки опредѣленнаго количества теплоты для того, чтобы превратиться въ воду. Слѣдовательно, треніе не уменьшаетъ теплоемкости тѣла“.

На этомъ онъ кончаетъ. Но нѣсколькими годами позже онъ приходитъ къ слѣдующему заключенію изъ своихъ опытовъ:

„Теплота или та сила, которая препятствуетъ дѣйстви- тельному соприкосновенію частичекъ (*corpuscles*) тѣла и ко- торая есть причина нашихъ ощущеній тепла и холода, мо- жетъ быть признана за особенное движеніе частицъ, вѣро- ятно, колебательное, стремящееся отдѣлить ихъ другъ отъ друга. Оно можетъ быть по праву названо отталкивательнымъ движеніемъ (*repulsive motion*). Тѣла бываютъ въ различныхъ состояніяхъ, и эти состоянія зависятъ отъ дѣйствія притяга- тельной и отталкивательной силъ ихъ частицъ, или, другими словами, отъ различныхъ величинъ отталкивательныхъ и при- тягательныхъ силъ“.

31. Дэви объясняетъ изъ этихъ опытовъ различіе между твердымъ и жидкимъ состояніями и между жид- костью и газомъ.

Плавленіе твердаго тѣла вообще производится сооб- щеніемъ ему теплоты. Другими словами, согласно толко- ванію Дэви, частицы твердаго тѣла приводятся въ ко- лебательное движеніе и такимъ образомъ, вслѣдствіе повторныхъ толчковъ другъ о друга, взаимно раздви- гаются. Онъ говоритъ еще, что это отталкивательное движеніе можно считать вполне аналогичнымъ такъ-на- зываемой центробѣжной силѣ въ движеніи планеты по орбитѣ, ибо чѣмъ быстрѣе одна частица движется во- кругъ другой, тѣмъ, конечно, шире будетъ орбита, въ которую она вгоняется. Слѣдовательно, частицы твер- даго тѣла разъединяются отталкивательнымъ дѣйствіемъ теплоты, и тѣло принимаетъ то состояніе, которое мы называемъ жидкимъ. Если мы еще увеличимъ количество придаваемой тѣлу теплоты, то связывающія силы будутъ, наконецъ, вполне побѣждены, и мы будемъ имѣть сво-

бодины частицы, какъ въ газѣ,—разлетающіяся во всѣ стороны, взаимно сталкивающіяся и только на самое короткое время достаточно приближающіяся другъ къ другу, чтобы привести въ дѣйствіе молекулярныя силы. Когда же молекулярныя силы придутъ на мгновеніе въ дѣйствіе, двѣ частицы могутъ пристать другъ къ другу, но скоро опять будутъ разъединены толчкомъ третьей частицы.

32. Мы должны сдѣлать ссылку еще на другія слова Дэви, такъ какъ они намъ покажутъ, когда и какъ онъ окончательно пришелъ къ ясному заключенію. Въ 1812 г. онъ высказалъ слѣдующее положеніе:

„Непосредственная причина явленія теплоты есть движеніе, и законы сообщенія тепла совершенно одинаковы съ законами сообщенія движенія“.

Если Дэви былъ въ состояніи установить такое положеніе, то ему оставалось лишь присоединить его ко второму толкованію третьяго закона Ньютона (см. выше § 18), и вся динамическая теорія теплоты была бы въ его власти. Но эти работы, опубликованныя Дэви въ 1812 году, также какъ болѣе раннія работы Румфорда и Дэви, остались тогда почти незамѣченными: ихъ разсматривали, можетъ быть, какъ остроумныя мысли, но не считали достойными утруждать вниманіе философовъ: лишь не ранѣе времени Джоуля, около 1840 г., на нихъ обратили вниманіе и отдали имъ ту справедливость, которой онѣ заслуживали по своему истинному значенію.

33. Обратимъ еще разъ вниманіе на то, какъ опредѣленно у обоихъ великихъ двигателей науки стремленіе основывать всѣ свои работы непосредственно на опытѣ. Ни у Румфорда, ни у Дэви мы не встрѣчаемъ

догадокъ *à priori*, или чего-нибудь въ этомъ родѣ. Они просто трудятся надъ изысканіемъ, что такое теплота, а не предаются размышленіямъ о томъ, чѣмъ она могла бы быть. Однако и до, и послѣ нихъ было не мало философовъ, которые, не сдѣлавъ ни единого опыта, или, въ лучшемъ случаѣ, ограничиваясь лишь грубѣйшими формами опыта, старались разсужденіемъ *à priori* открыть, что такое теплота *).

34. Изслѣдованія Кольдингга и Джоуля, начавшіяся около 1840 г., не могутъ быть здѣсь описаны подробно; потому что, хотя безспорно имъ принадлежитъ дѣло окончательнаго изложенья теплорода, какъ невѣсимаго начала, но ихъ замѣчательные опыты (и въ особенности опыты Джоуля) распространяются на всѣ формы энергіи и поэтому включаютъ огромную массу предметовъ, вполне выходящихъ за предѣлы этого сочиненія.

По скольку, однако, они относятся къ нашему настоящему вопросу, эти изслѣдованія подтвердили заключенія Румфорда и Дави; они способствовали гораздо болѣе точному опредѣленію *динамическаго* (или, какъ обыкновенно, но неправильно говорятъ, *механическаго*) эквивалента теплоты, чѣмъ то число, которое выше (§ 28) было выведено изъ нѣсколькихъ опытныхъ данныхъ Румфорда.

35. Обширные и чрезвычайно точные опыты Джоуля въ 1843 и слѣдующихъ годахъ, основанные непосредственно на процессахъ тренія, привели къ числамъ, изменяющимся отъ 770 до 774 футофунтовъ энергіи, какъ эквиваленту одной единицы теплоты (опредѣленіе ея см.

*) Относительно вопроса о первенствѣ Майера и Джоуля см. § 399.

ниже, § 37) по шкалѣ Фаренгейта. Окончательно принятое Джоулемъ число (для широты Манчестера) есть 772 *), и погрѣшность этого числа, конечно, значительно меньше 1%.

Джоуль подтвердилъ этотъ результатъ въ 1853 г. весьма точнымъ опредѣленіемъ удѣльныхъ теплотъ воздуха и прямымъ опытнымъ доказательствомъ (даннымъ въ 1845 г.) того, что количество теплоты, развивающееся при быстромъ сжатіи воздуха, очень близко къ эквиваленту затраченной работы.

36. Прямые измѣренія теплоты, возбуждаемой затратой механической энергіи, были сдѣланы различными способами Кольдингомъ въ 1843 г. и повторены, со времени опубликованія (въ 1849 г.) окончательнаго результата Джоуля, во многихъ формахъ Гирномъ, Реньо и другими.

Прямое доказательство факта, что теплота исчезаетъ, когда работаетъ паровая машина, послѣ неуспѣшной попытки Сегэна въ 1839 г., было впервые дано Гирномъ въ 1857 году.

Большое разнообразіе косвенныхъ способовъ для болѣе точнаго опредѣленія механическаго эквивалента теплоты было съ успѣхомъ приложено въ теченіе послѣднихъ тридцати лѣтъ многими экспериментаторами. Первые по времени опредѣленія этого рода, конечно, тѣ, которыя сдѣланы Джоулемъ въ 1843 и слѣдующихъ годахъ съ помощью магнитоэлектричества.

37. Результаты всѣхъ подобныхъ опытовъ могутъ быть кратко соединены въ слѣдующемъ чрезвычайно важномъ положеніи, которое составляетъ

*) Въ килограмметрахъ и градусахъ Цельсія 423,8.

Первый законъ термодинамики. Когда равныя количества механической работы производятся какимъ-либо способомъ помощью чисто тепловаго источника или расходуются на чисто тепловыя дѣйствія, тогда исчезаютъ или порождаются равныя количества теплоты. Именно, подъ широтой Манчестера, 772 фунта работы, превратившись въ теплоту, способны нагрѣть 1 фунтъ воды съ 50° F до 51° F.

38. Хотя опытами въ родѣ тѣхъ, которые были упомянуты (но еще не описаны и не объяснены), доказано, что теплота есть форма энергій—или кинетическая, или потенциальная—но мы еще далеки отъ знанія того механизма, отъ котораго зависитъ тепловая энергія.

Сославшись опять на §§ 30 и 31, можно вообще сказать, что мы имѣемъ еще очень мало свѣдѣній о природѣ внутренняго тепловаго движенія и т. д. частицъ твердыхъ и жидкихъ тѣлъ.

39. Но мы имѣемъ изъ разнаго рода опытовъ, совершенно отличныхъ отъ предыдущихъ, объясненіе, скорѣе вѣроятное, нежели достаточное, тепловыхъ дѣйствій въ газахъ—и вмѣстѣ съ тѣмъ хоть общую идею о природѣ того движенія, отъ котораго зависитъ теплота въ такихъ тѣлахъ. Эта идея, намѣченная въ § 31, была впервые высказана Д. Бернулли *); но она воскрешена и чрезвычайно развита въ послѣдніе годы Гераномъ, Джоулемъ, Клаузіусомъ, Клеркъ-Максвеллемъ, Больцманомъ и другими. Она оказалась пригодною для объясненія большаго числа извѣстныхъ свойствъ газовъ; и ей, повидному, предстоитъ, въ сравнительно короткое время, удовлетворить всѣмъ требованіямъ, какія могутъ

*) *Hydrodynamica, sectio decima: Argentorati, 1788.*

быть предъявлены физической теоріи движеній, удара и т. д. такихъ частичекъ матеріи, которыхъ крайне малые размѣры ставятъ ихъ вполне и навсегда за предѣлы силы наиболѣе совершенныхъ *возможныхъ* микроскоповъ.

40. Съ другой совсѣмъ отличной точки зрѣнія мы имѣемъ замѣчательныя указанія на природу того движенія, отъ котораго зависитъ лучистая теплота. Здѣсь обстоятельства намъ въ особенности благопріятствуютъ, такъ какъ имѣется полное опытное доказательство, что природа и механизмъ распространенія лучистой теплоты совершенно тѣ же, какъ и свѣта (§ 3). Мы имѣемъ такимъ образомъ два вполне независящихъ другъ отъ друга органа чувствъ для изученія этихъ родственныхъ явленій.

41. *Содержаніе §§ 21—40.* Теплота, какъ теперь *доказано*, есть форма энергіи. Отсюда *первый законъ термодинамики*, который лишь устанавливаетъ эквивалентность теплоты и работы и даетъ численную величину такъ-называемаго *эквивалента Джоуля*. Механизмъ, отъ котораго зависитъ тепловая энергія (по крайней мѣрѣ, вѣроятно), приблизительно извѣстенъ по отношенію къ газамъ и по отношенію къ лучистой теплотѣ. Затѣмъ мы имѣемъ еще очень мало свѣдѣній по этому предмету.

42. **Дѣйствія теплоты.** — Они чрезвычайно разнообразны и многочисленны; въ нашемъ настоящемъ *бѣгломъ* очеркѣ мы можемъ коснуться лишь нѣкоторыхъ наиболѣе обыкновенныхъ или наиболѣе выдающихся изъ этихъ дѣйствій. Ихъ можно подраздѣлить слѣдующимъ образомъ:

а. Измѣненіе размѣровъ или внутреннихъ напряженій въ твердыхъ тѣлахъ; объема или давленія въ жидкостяхъ и газахъ.

- б. Измѣненіе молекулярнаго состоянія.
- с. Измѣненіе температуры.
- д. Электрическія дѣйствія.
- е. Дѣйствія, *вызывающія* химическія измѣненія.

43 (а). Измѣненіе размѣровъ и внутреннихъ напряженій твердыхъ тѣлъ отъ теплоты извѣстно каждому уже изъ обыденнаго опыта. Мы возьмемъ наугадъ нѣсколько примѣровъ, но для учащагося было бы хорошимъ упражненіемъ, если бы онъ попытался подобрать ихъ еще; подобное же упражненіе будетъ очень полезно и въ другихъ частяхъ нашего предмета.

Колесо стягивается шиною; въ орудіи изъ кованаго желѣза внутренней цилиндръ обвивается въ нѣсколько рядовъ желѣзными полосами, такъ что каждый внѣшній слой стягиваетъ внутреннѣе. И въ первомъ, и во второмъ случаѣ стягиваніе производится тѣмъ, что нагрѣваютъ шину или желѣзныя полосы, накладываютъ ихъ еще въ расширенномъ отъ тепла состояніи и затѣмъ охлаждають быстро или медленно, смотря по надобности.

Рельсы кладутся концами не плотно другъ къ другу, но съ небольшими промежутками; иначе въ лѣтній день, расширившись значительно болѣе грунта, на которомъ они держатся, рельсы погнулись и смѣстили бы другъ друга.

Огромныя металлическія трубы Мензѣйскаго моста (Menz bridge) не укрѣплены плотно на концахъ, такъ какъ иначе ихъ упоры были бы разорваны; концы трубъ лежатъ на валькахъ и могутъ свободно расширяться и сжиматься при измѣненіяхъ температуры.

Некомпенсированные стѣнные и карманные часы (если ихъ *средній* ходъ точно установленъ) отстають лѣтомъ и идутъ впередъ зимой; первые единственно, а

вторые главнымъ образомъ вслѣдствіе измѣненія размѣровъ движущихся частей отъ теплоты. Прикосновеніе пальцемъ къ раздѣленному лимбу точнаго меридіональнаго круга производитъ ощутительное измѣненіе въ результатѣ измѣренія зенитнаго разстоянія звѣзды.

Арфа, настроенная въ теплой комнатѣ, замѣтно повышаешь свой тонъ, будучи вынесена на морозный воздухъ.

Телеграфныя проволоки «отвисаютъ» тѣмъ сильнѣе, чѣмъ выше температура воздуха.

Массивныя стѣны, раздвинувшіяся вслѣдствіе перегрузки крышей или верхними этажами зданія, были приведены въ вертикальное положеніе сжатіемъ пропущенныхъ сквозь нихъ желѣзныхъ брусевъ: для этого на концы брусевъ, находившихся въ расширенномъ отъ нагрѣванія состояніи, съ наружной ихъ стороны, плотно навинчивали гайки.

44. (*a, продолженіе*). Великія теченія, постоянно обращающіяся въ океанѣ и въ атмосферѣ, происходятъ главнымъ образомъ отъ расширенія воды и воздуха отъ тепла. Нагрѣтыя части, при одномъ и томъ же объемѣ, легче холодныхъ и поднимаются вверхъ въ силу обыкновеннаго гидростатическаго закона, которымъ объясняется плаваніе масла на водѣ и поднятіе аэростата въ воздухѣ. Въ меньшемъ размѣрѣ примѣрами того же дѣйствія могутъ служить: восхожденіе того, что мы называемъ *дымомъ* нашихъ печей, вентиляція минъ помощью огня, который разводится на днѣ колодца, устроеннаго для выхода воздуха и т. д.

45 (*b и c*). Возьмемъ кусокъ очень холоднаго льда. Этотъ ледъ, хотя утвержденіе и можетъ показаться сперва немного страннымъ, есть настоящій камень—

точно также, какъ кусокъ каменной соли или свинцоваго блеска—его молекулярное или кристаллическое сложеніе лишь нѣсколько сложнѣе. Какъ и другіе камни, онъ становится теплѣе отъ всякаго новаго прибавленія теплоты, но только до *известной точки*, которую мы называемъ *точкою плавленія*; и мы не можемъ сдѣлать его еще теплѣе. Теплота теперь не измѣняетъ температуры—она измѣняетъ молекулярное состояніе. То же самое относится и къ каменной соли, съ тою лишь разницею, что точка плавленія ея значительно выше, чѣмъ льда.

Положимъ, что теплоты было сообщено какъ разъ достаточно для расплавленія всего льда. Съ химической точки зрѣнія мы имѣемъ все то же вещество, его температура та же, какъ температура плавленія; но мы имѣемъ жидкое тѣло вмѣсто твердаго.

46 (*b* и *c*, *продолженіе*). Придадимъ водѣ больше теплоты. Теперь ея дѣйствіе будетъ состоять въ нагрѣваніи воды: говоря научнымъ языкомъ, температура воды повысится. Каждое новое прибавленіе теплоты повышаетъ температуру болѣе и болѣе, пока она не достигнетъ того, что называется *точкой кипѣнія*: здѣсь повышение температуры опять останавливается. Дальѣйшее прибавленіе теплоты производитъ новое измѣненіе молекулярнаго состоянія, и жидкость превращается въ пары, въ водяной паръ.

47 (*b* и *c*, *продолженіе*). Положимъ, что теплота была придаваема до тѣхъ поръ, пока вся жидкость, безъ дальнѣйшаго повышенія температуры, превратилась въ паръ—въ *насыщенный паръ*, говоря технически; теперь мы можемъ, прибавляя еще теплоты, повысить температуру этого пара: получается то, что называютъ *перегрѣтымъ*

паромъ и что по всѣмъ свойствамъ есть газъ. Но этотъ газъ не можетъ быть нагрѣваемъ неограниченно далѣе безъ того, чтобы не произошло новое молекулярное измѣненіе—измѣненіе, обыкновенно называемое въ этомъ случаѣ химическимъ—*диссоціація*, т. е. разложеніе, или раздѣленіе водяного газа на его составныя части, кислородъ и водородъ.

Опытъ не показалъ намъ еще, можетъ ли дальнѣйшее прибавленіе теплоты измѣнить физическую или химическую природу каждаго изъ этихъ теперь лишь *смышанныхъ* другъ съ другомъ газовъ.

48. Такимъ образомъ, послѣдовательныя дѣйствія теплоты, прибавляемой къ куску очень холоднаго льда, суть:

1. Нагрѣваніе.
2. Плавленіе.
3. Нагрѣваніе.
4. Испареніе.
5. Нагрѣваніе.
6. Диссоціація.
7. Нагрѣваніе.

Вода—вещество всѣмъ хорошо знакомое; какъ мы видѣли, она представляетъ прекрасный и поучительный примѣръ различныхъ послѣдовательныхъ измѣненій состоянія и температуры. Немногія другія вещества, по крайней мѣрѣ, при нашихъ наличныхъ очень ограниченныхъ опытныхъ средствахъ, представляютъ такой полный рядъ измѣненій. Съ другой же стороны, есть вещества, каковы *уголь*, которыя мы даже не можемъ расплавить; есть другія, какъ свободный *водородъ*, которыя до конца 1877 года намъ были извѣстны лишь въ газообразномъ состояніи.

49 (d). Некоторые кристаллы, напр. турмалинъ, при нагреваніи притягиваютъ другія тѣла точно такъ, какъ сургучъ или стекло, наэлектризованные треніемъ. Эта область нашего предмета однако еще очень темна и не дала еще результатовъ большого значенія, хотя возможно, что она сдѣлается источникомъ огромнаго обогащенія нашего знанія.

49 (d, продолженіе). Но то, что обыкновенно называется *термо-электричествомъ*, имѣетъ уже огромное практическое и теоретическое значеніе, какъ читатель увидитъ, когда мы дойдемъ до вопроса объ измѣреніи теплоты и температуры.

Основное явленіе термоэлектричества, открытое около 1820 г. Зеебекомъ, состоитъ въ слѣдующемъ:

Если въ замкнутой цепи, составленной изъ двухъ металловъ, одно изъ мѣстъ соединенія будетъ нагрѣто до болѣе высокой температуры, чѣмъ другое, то по цепи проходитъ электрическій токъ, напряженность котораго (вообще) увеличивается съ увеличеніемъ разности температуръ обоихъ мѣстъ соединенія. Токъ получаетъ обратное направленіе, если болѣе холодное мѣсто соединенія сдѣлать, напротивъ, болѣе теплымъ.

Напримѣръ, если мы соединимъ концы желѣзной и мѣдной проволокъ посредствомъ скручиванія, спайванія или иначе, то мы образуемъ такъ-называемую *цепь*, или замкнутый путь, по которому можетъ протекать электрическій токъ.

Пусть *A* и *B* на рис. 2 будутъ два (необходимыя) мѣста соединенія. Для идущаго вокругъ цепи по направленію стрѣлокъ эти мѣста будутъ отличаться другъ отъ друга тѣмъ, что въ *B* будетъ переходъ *отъ же- лѣза къ мѣди*, тогда какъ въ *A*—*отъ мѣди къ желѣзу*;

при движеніи же по кругу въ обратномъ направленіи. Эти признаки обоихъ мѣстъ соединенія являются *обращенными*. Теперь положимъ, что вся цѣпь находится при нѣкоторой обыкновенной температурѣ и что къ *A* (на одно только мгновеніе) приближено пламя лампы. По цѣпи, по направленію стрѣлокъ будетъ проходить токъ, который продолжится, хотя и постепенно ослабѣвая, до тѣхъ поръ, пока мѣсто, наконецъ, не охладится опять настолько, что его температура сравняется съ температурой *B*. Вотъ въ чемъ состоитъ открытіе

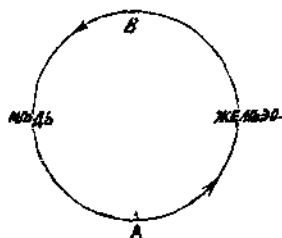


Рис. 2.

Зеебека. Сказанное выше о различіи обоихъ мѣстъ соединенія показываетъ намъ, что если лампу на мгновеніе приблизить къ *B*, то въ цѣпи произойдетъ токъ направленія обратнаго тому, которое указывается стрѣлками. Вообще, при означенныхъ условіяхъ *токъ идетъ черезъ болѣе теплый спай отъ меди къ железу*. (Это правило примѣнимо во всѣхъ случаяхъ, когда ни одинъ изъ спаевъ не нагревается очень сильно. Учащійся лишь сбился бы, если ему теперь же привести общій законъ, котораго данное выше правило составляетъ только частный случай. Предметъ будетъ сполна разсмотрѣнъ позже).

50. (*д, продолженіе*). Положимъ теперь, что мы имѣемъ замкнутую цѣпь, состоящую изъ нѣсколькихъ кусковъ желѣзной и мѣдной проволоки, соединенныхъ попеременно, какъ видно изъ рис. 3. Она можетъ быть не длиннѣе (и, слѣдовательно, не представлять бѣльшаго *сопротивленія* электричеству), чѣмъ только что описанная цѣпь изъ двухъ частей. Эта послѣдняя въ самомъ дѣлѣ можетъ быть разрѣзана на меньшія части и перестроена. Назовемъ послѣдовательные спаи по порядку A_1, B_1, A_2, B_2 и т. д. Тогда ясно, что идущій по цѣпи въ направленіи, обозначенномъ стрѣлками, въ каждомъ

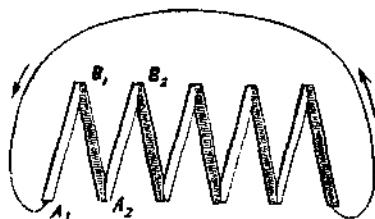


Рис. 3.

спаѣ А будетъ переходить отъ мѣди къ желѣзу, а въ каждомъ спаѣ В—отъ желѣза къ мѣди. Слѣдовательно, всѣ спаи А, будучи нагрѣты, произведутъ термоэлектрическій токъ въ направленіи стрѣлокъ. Если же нагрѣть всѣ спаи В, то токъ пойдетъ по обратному направленію.

Тогда какъ въ простой цѣпи мы имѣли лишь одинъ теплый спай, здѣсь мы можемъ имѣть ихъ сколько угодно; очевидно, что помощью этого приспособленія мы можемъ увеличивать силу электрическаго тока (для одной и той же разности температуръ теплыхъ и холодныхъ спаевъ) пропорціонально *общему числу спаевъ*.

Для удобства примѣненія, проволоки или полоски A_1B_1 , B_1A_2 , A_2B_2 и т. д. дѣлаются всѣ одинаковой длины и складываются вмѣстѣ, какъ можно тѣснѣе, въ такъ - называемой *термоэлектрической столбикъ*, такъ чтобы всѣ спаи A были съ одной стороны, всѣ спаи B —съ другой (рис. 4). Каждая двѣ сосѣднія полоски

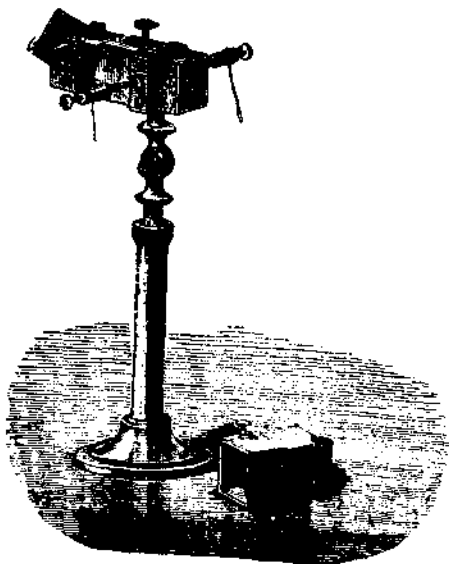


Рис. 4.

отдѣляются другъ отъ друга тонкой бумагой, гуттаперчей или другимъ изолирующимъ матеріаломъ и соприкасаются другъ съ другомъ только въ мѣстахъ соединенія, гдѣ онѣ спаены. Остается еще прибавить слѣдующее. Такъ какъ Зеебекъ нашелъ, что токи, производимые попережнымъ соединеніемъ пластинокъ изъ висмута и сурьмы, гораздо сильнѣе тѣхъ, которые при

одинаковыхъ условіяхъ температуры и сопротивленія производятся желѣзомъ и мѣдью, то столбикъ обыкновенно дѣлается изъ пластинокъ первыхъ двухъ металловъ. Этотъ драгоценный приборъ изобрѣтенъ Нобили (1834).

51. (е). Нѣтъ, конечно, сомнѣнія въ томъ, что именно теплота, возбуждаемая треніемъ, зажигаетъ частички желѣза при употребленіи прежняго «кремня и огнива» точно такъ, какъ она воспламеняетъ аморфный фосфоръ въ соприкосновеніи съ хлорноватокалиевой солью въ нашихъ «безопасныхъ спичкахъ»; или какъ теплота раскаленной до-красна кочерги причиняетъ взрывъ пороха. Во всѣхъ подобныхъ случаяхъ теплота является *побудительною причиною* химическаго соединенія; она вызываетъ на дѣлѣ явленіе обратное тому, которое производитъ при диссоціаціи (§ 47).

52. **Измѣреніе теплоты и температуры.**— Полное различіе между понятіями о теплотѣ и температурѣ не можетъ быть очень рано усвоено учащимся. Теплота, какъ мы видѣли, есть *нѣчто реальное*, форма энергіи. Что же касается температуры, то для начала можно разсматривать ее только какъ *условіе*, опредѣляющее, которое изъ двухъ приведенныхъ въ соприкосновеніе тѣлъ будетъ передавать теплоту другому. Такое разсмотрѣніе согласуется съ наблюдаемыми фактами: это видно изъ того, что если *A* имѣетъ одинаковую температуру съ *B* и также одинаковую съ *C*, то между *B* и *C* каковы ни были эти тѣла, нѣтъ передачи теплоты, т. е. *тѣла, имѣющія одинаковую температуру съ другими тѣлами, сами имѣютъ одну и ту же температуру*.

Ссылаясь на одну изъ прежде употребленныхъ аналогій, теплоту можно сравнить съ количествомъ воздуха

въ резервуарѣ, температуру—съ давленіемъ этого воздуха. Если сообщить трубкой два резервуара, содержащихъ воздухъ, то воздухъ стремится переходить изъ того резервуара, въ которомъ давленіе больше, въ тотъ, гдѣ оно меньше. И это совершенно не зависитъ отъ количества воздуха въ обоихъ резервуарахъ. Тотъ изъ нихъ, который отдаетъ часть своего воздуха, можетъ быть гораздо меньше другого и содержать гораздо меньше воздуха: направленіе передачи опредѣляется исключительно разностью давленій.

53. Какъ одинъ резервуаръ можетъ быть емкостіе другого и содержать больше воздуха при данномъ давленіи, такъ точно одно тѣло можетъ имѣть большую *емкость къ теплотѣ*, чѣмъ другое и, слѣдовательно, содержать больше теплоты даже при одной и той же температурѣ.

Это различіе въ емкости можетъ происходить частью или отъ количества вещества (какъ напр., если мы сравнимъ океанъ съ прудомъ), или же и отъ особеннаго свойства самаго вещества; дѣйствительно, мы увидимъ далѣе, что вода имѣетъ въ тридцать разъ большую емкость къ теплу, нежели равная ей масса ртути. Это особенное свойство извѣстно подъ именемъ *удѣльной теплоты*, — выраженіе, заимствованное изъ прежнихъ ложныхъ представленій о природѣ теплоты, но въ настоящее время уже укоренившееся и принятое въ научной рѣчи.

54. Такимъ образомъ, количество теплоты, которое расходуется во всѣхъ печахъ, горнахъ и т. д. Великобританіи въ теченіе цѣлаго года—которое доводитъ до бѣлаго каденія милліоны тоннъ каменнаго угля и жидкаго желѣза—ничто въ сравненіи съ тѣмъ, какое нужно

для повышенія средней температуры Атлантического океана на одинъ только градусъ термометра.

55. Ссылаясь опять на общее начало, высказанное въ § 9, ясно, что мы можемъ измѣрять количество теплоты помощью нѣкоторой *единицы теплоты*, которую можно опредѣлить, какъ количество теплоты, потребное или для расплавленія фунта льда при точкѣ замерзанія, или для нагрѣванія фунта воды отъ точки замерзанія до точки кипѣнія, или вообще для того, чтобы *произвести нѣкоторое определенное физическое измѣненіе въ данной массѣ данного вещества*. Или, такъ какъ мы знаемъ, что теплота есть форма энергіи, то мы можемъ динамически измѣрять ея количество эквивалентнымъ числомъ футофунтовъ работы (§ 37).

Единица теплоты, обыкновенно употребляемая въ Англіи, опредѣляется, какъ количество теплоты, потребное для нагрѣванія одного фунта воды отъ температуры, называемой $50^{\circ}F$, до температуры, называемой $51^{\circ}F$ *).

56. Конечно, мы одинаково можемъ принять такъ называемыя метрическія единицы и шкалу стоградуснаго термометра вмѣсто шкалы Фарингейта; но замѣна

*) Практическая единица теплоты, основанная на метрическихъ мѣрахъ и градусахъ Цельсія, обыкновенно опредѣляется, какъ количество теплоты, которое потребно для нагрѣванія 1 килограмма воды отъ 0° до $1^{\circ}C$. Эта единица мало-по-малу входитъ во всеобщее употребленіе. Зам. р. перев.

Максвелль принимаетъ для промежутка температуръ $4-5^{\circ}C$, другіе $15-16^{\circ}$ (послѣднее — какъ среднюю комнатную температуру). Очень цѣлесообразнымъ является предложеніе Вунзена (Шуллера, Варта (Wartha) и Пфаундлера) считать за единицу теплоты сотую долю того количества теплоты, которое нагрѣваетъ килограммъ воды отъ 0° до $100^{\circ}C$. Это опредѣленіе аналогично опредѣленію температуры въ § 61.

одной изъ этихъ системъ другой не имѣетъ принципіальнаго значенія, а есть лишь дѣло удобства и въ худшемъ случаѣ ведетъ лишь къ ариѳметическому дѣйствию умноженія или дѣленія на опредѣленное число. Такіе вопросы рѣдко возвышаются до *научнаго* значенія, хотя и могутъ подавать поводъ (часто справедливо) къ разсужденіямъ о сравнительномъ удобствѣ разныхъ системъ.

[Такимъ образомъ не можетъ быть сомнѣнія, что *метр* слишкомъ великъ, а *килограммъ* слишкомъ тяжелъ для обыкновенныхъ житейскихъ нуждъ.

Средняя длина рука торговки и среднее количество чая или сахара, спрашиваемое заразъ мелкимъ покупателемъ, понятно, не имѣютъ никакой необходимой связи съ десятиmillіонной долей четверти земного меридіана, проходящаго черезъ Парижъ, или съ наибольшей плотностью воды. Между тѣмъ нормальные *ардъ* и *фунтъ*, безъ сомнѣнія, были съ самаго начала выбраны примѣнительно къ сказаннымъ житейскимъ потребностямъ—соотвѣтственно среднему росту торговки и платежной силѣ обыкновеннаго покупателя. Но все это неоправданное превосходство нашей системы единицъ передъ метрическою исчезаетъ въ виду тѣхъ безобразныхъ отношеній, которыя она представляетъ, когда мы переходимъ къ кратнымъ и подраздѣленіямъ единицъ. Для всякаго, кто пользуется десятичною системою счета, самая скромная доля послѣдовательности сдѣлала бы немислимымъ употребленіе какой-либо другой системы умноженія и подраздѣленія единицъ, кромѣ десятичной. Всѣ ужасы старой логики съ ея *barbara celarent* и пр. или латинской грамматики съ ея *as in presenti* и т. п. кажутся почти что естественными при сопоставленіи съ подобными соотношеніями:

12 дюймовъ=1 футу, 3 фута=1 ярду, 220 ярдъ=1 ферлонгу, 8 ферлонгъ=1 милѣ.

Но и это ничто въ сравненіи съ огромной кучей разныхъ poles или goods, гранъ Troy и Avoirdupois драхмъ и унцій].

57. Измѣреніе *температуры*, отъ котораго, какъ мы видѣли (§ 52), въ концѣ концовъ зависитъ измѣреніе количества теплоты, представляетъ намъ совершенно неограниченный выборъ приѣмовъ.

Можно выбрать любое изъ тепловыхъ *дѣйствій* (которыя намъ уже вкратцѣ разсмотрѣны) и взять какое бы то ни было вещество.

Мы увидимъ однако, когда покончимъ съ этими предварительными разсмотрѣніями, что *второй законъ термодинамики* позволяетъ намъ дать абсолютное опредѣленіе температуры: абсолютное въ томъ смыслѣ, что оно совершенно не зависитъ отъ физическихъ свойствъ какаго-либо особаго рода вещества, а только отъ законовъ превращенія энергіи.

58. Читатель сразу видитъ, что разъ есть такая абсолютная шкала температуры, она должна быть принята во всѣхъ дѣйствительно научныхъ заключеніяхъ изъ результатовъ опыта; но весьма возможно, что непосредственное примѣненіе ея въ теченіе самаго хода опыта или наблюденія представило бы значительныя трудности.

59. Мало, даже очень мало экспериментальныхъ измѣреній, требующихъ большей точности, производятся въ тѣхъ самыхъ научныхъ или другихъ единицахъ, къ которымъ окончательно приводятся результаты измѣренія. Такъ, при устройствѣ винтоваго микрометра для тонкихъ астрономическихъ или другихъ измѣреній нѣтъ надобности, если бы это даже было осуществимо, давать

винту *въ точности* 10 или 100 оборотовъ на дюймъ. Необходимо лишь, чтобы винтовая нартзка была хороша, т. е. равномерна—точная длина хода не имѣетъ никакого значенія. Если наблюдатель разъ навсегда измѣрилъ винтомъ нѣсколько предметовъ или угловъ известной уже величины, то онъ найдетъ помощью простого ариметическаго дѣйствія *значеніе одного полного оборота*, а отсюда и значеніе всякаго другого отчета.

Трубки очень точныхъ термометровъ для изслѣдованій часто не только калибруются, но и *градуируются* прежде, чѣмъ будетъ выдутъ шарикъ. Точки замерзанія и кипѣнія устанавливаются затѣмъ съ величайшимъ тщаніемъ въ доляхъ произвольной шкалы термометра, и шкала такимъ образомъ (при помощи ариметическаго дѣйствія) дѣлается совершенно опредѣленной повсюду.

Мало того, что употребленіе подобнаго инструмента не представляетъ неудобствъ, произвольная шкала часто имѣетъ положительную выгоду для наблюдателя, такъ какъ она не позволяетъ ему (даже самый добросовѣстный и точный наблюдатель очень къ тому склоненъ) безсознательно подпадать вліянію того обстоятельства, что онъ напередъ знаетъ, каковъ будетъ ожидаемый отчетъ. И чисто ариметическая трудность перехода отъ одной шкалы къ другой столь ничтожна сравнительно съ трудностями опыта, что ею можно было бы совершенно пренебречь, даже если бы не была обезпечена опредѣленная выгода, состоящая въ полной независимости наблюдателя отъ всякаго предвзятаго мнѣнія.

60. Въ нашемъ предварительномъ очеркѣ предмета намъ нужно не строгое научное измѣреніе температуры, но нѣчто такое, что одновременно легко понималось и воспроизводилось бы и что потребовало бы вполнѣдствіи

лишь очень малаго измѣненія для перехода къ абсолютной шкалѣ.

Вездѣ легко получить почти вполнѣ чистую воду. Нашъ же основной принципъ (§ 9) утверждаетъ, что измѣненія, называемыя плавленіемъ и кипѣніемъ, будутъ происходить съ однимъ и тѣмъ же веществомъ всегда при точно опредѣленныхъ для каждаго изъ этихъ процессовъ условіяхъ.

Мы увидимъ позже, что единственныя условія, которыя здѣсь должны быть на лицо, суть условія температуры и давленія. Поэтому, мы *утверждаемъ* теперь, что

Опредѣленному давленію соответствуютъ опредѣленная температура, при которой плавится чистый ледъ, и другая опредѣленная температура, при которой кипитъ чистая вода.

61. Мысль выбрать двѣ такія постоянныя температуры для опредѣленія термометрической шкалы, принадлежитъ Ньютону.

Для нашей настоящей цѣли положимъ, что мы имѣемъ сосудъ, въ которомъ таетъ ледъ, и другой, въ которомъ кипитъ вода, причемъ барометръ стоитъ на 30 дюм. *).

Если мы назовемъ температуру холодной воды нулемъ, или 0° , а кипящей воды 100° , то мы примемъ такъ называемую *стоградусную* шкалу.

Далѣе очевидно, что мы можемъ получить всевозможныя промежуточныя температуры, смѣшивая въ различныхъ отношеніяхъ воду изъ того и другого сосуда. И мы можемъ *опредѣлить* промежуточные градусы, сказавъ,

*) Мы можемъ здѣсь увѣрить учащагося, что дать ему теперь строго научное опредѣленіе температуры, называемой «точкою кипѣнія», значило бы лишь сбить его съ толку.

что процентное содержаніе (по объему или лучше) по вѣсу горячей воды въ каждой смѣси есть температура этой смѣси въ градусахъ. Такъ, 10°C была бы температура смѣси 10 фунтовъ воды при 100°C съ 90 фунтами воды при 0° и т. п. Понятно, что это есть лишь одинъ изъ безчисленныхъ способовъ, какими могутъ быть определены промежуточные градусы; но онъ имѣетъ преимущество въ непосредственности и простотѣ, будучи въ то же время достаточно близокъ къ абсолютной шкалѣ для нашихъ настоящихъ цѣлей. Онъ имѣетъ еще ту выгоду, что это единственный способъ, при которомъ температура смѣси равныхъ вѣсовъ, взятой при двухъ какихъ-либо температурахъ, имѣетъ какъ разъ среднее между ними значеніе.

До тѣхъ поръ, какъ намъ можно будетъ показать необходимость и возможность улучшеній въ этой шкалѣ, мы будемъ въ нашемъ трудѣ ею пользоваться; ибо она настолько согласуется съ абсолютной шкалой, что требуются тщательные опыты даже для того, чтобы показать ея неполное совпаденіе съ абсолютной шкалой.

62. Тепловое дѣйствіе, которое обыкновенно примѣняется для измѣренія теплоты и температуры, есть измѣненіе объема жидкостей (§ 42). Мы увѣрены, что каждый читатель имѣетъ хотя нѣкоторое знакомство съ обыкновеннымъ *термометромъ*. Употребляемая въ немъ жидкость—ртуть или спиртъ. Предосторожности, необходимые при устройствѣ и употребленіи термометра, будутъ разобраны позже. Другое тепловое дѣйствіе, обыкновенно употребляемое для тѣхъ же цѣлей, есть уже описанное нами термоэлектрическое дѣйствіе.

Основанный на немъ способъ въ двойномъ отношеніи далеко выше всякихъ другихъ: во-первыхъ, онъ го-

раздо чувствительнѣе, а во-вторыхъ, показанія могутъ быть при немъ легко сдѣланы видимыми для самой большой аудиторіи.

Способъ основанъ на томъ фактѣ, что, по крайней мѣрѣ для малой разности температуръ спаевъ, сила электрическаго тока прямо пропорціональна этой разности.

Поэтому гальванометръ, приборъ, измѣряющій силу производимаго электрическаго тока, въ то же самое время измѣряетъ разность температуръ обоихъ спаевъ.

63. Здѣсь необходимо отклониться въ сторону. Основной фактъ термоэлектричества (§ 49) прямо входитъ въ составъ нашего предмета; основное же явленіе электромагнетизма, отъ котораго зависитъ дѣйствіе гальванометра, относится къ совершенно чуждой области.

Явленіе, открытое Эрстедомъ въ 1820 г., состоитъ въ томъ, что *положеніе свободно подвѣшеннаго магнита вообще измѣняется при прохожденіи электрическаго тока въ его соседствѣ.*

Прилагаемый рисунокъ изображаетъ въ существенныхъ чертахъ ту единственную форму опыта, какая намъ необходима.

Длинная мѣдная проволока, покрытая шелкомъ или гуттаперчей для того, чтобы воспрепятствовать прикосновенію частей проволоки другъ съ другомъ или съ другимъ металломъ, наматывается значительнымъ числомъ оборотовъ по кругу; свободные же концы ея соединяются—одинъ съ цинковой пластинкой, другой съ мѣдной. Обмотка устанавливается вертикально въ магнитномъ меридіанѣ и внутри ея горизонтально подвѣшивается на тонкой шелковинкѣ намагниченный стальной брусокъ. Когда цинковая и мѣдная пластинки сухи и не находятся въ металлическомъ соприкосновеніи, намагни-

ченный брусокъ, конечно, принимаетъ направленіе къ сѣверному магнитному полюсу и, слѣдовательно, устанавливается въ плоскости проволоочной обмотки. Но какъ только пластинки будутъ погружены въ сосудъ съ водою, слегка подкисленной, и какъ только черезъ это возникаетъ токъ, который пройдетъ вокругъ обмотки, такъ магнитъ отклонится и будетъ стремиться, по скольку онъ въ состояніи, стать подъ прямымъ угломъ къ плоскости обмотки. На нашемъ рисункѣ брусокъ стремился бы повернуться тѣмъ или другимъ концомъ въ направленіи къ наблюдателю.

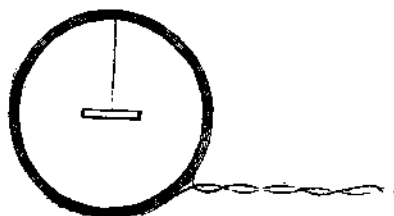


Рис. 5.

Положеніе, которое окончательно принимаетъ брусокъ, зависитъ отъ относительной величины силъ, съ какими дѣйствуютъ на него магнетизмъ земли и электрическій токъ. Если токъ очень слабъ, магнитъ отклоняется очень мало; при весьма сильномъ токѣ магнитъ становится почти перпендикулярно къ плоскости обмотки. Такимъ образомъ изъ величины *отклоненія* можетъ быть вычислена *сила* тока. *Направленіе*, въ которомъ токъ обходитъ по обмоткѣ, опредѣляетъ, въ какую сторону отъ обмотки магнитъ будетъ отклоненъ. Это легко показать, перемѣняя между собой мѣдную и цинковую пластинки:

мы получимъ тогда отклоненіе въ обратную сторону. Можно слѣдующимъ образомъ выразить правило для опредѣленія направленія, въ которомъ отклоняется магнитъ. Положимъ, что на рисункѣ мы смотримъ на обмотку съ запада; тогда лѣвый конецъ магнита есть то, что обыкновенно называютъ его сѣвернымъ полюсомъ. Если токъ пропускается такимъ образомъ, что положительное электричество обходитъ обороты проволоки въ направленіи стрѣлки часовъ, то сѣверный конецъ магнита подвинется къ *востоку* отъ обмотки, т. е. въ направленіи *отъ* наблюдателя.

64. Гальванометръ обыкновенно дѣлается малыхъ размѣровъ, такъ какъ дѣйствіе тока на магнитные полюсы внутри обмотки тѣмъ больше, чѣмъ меньше ея радіусъ (предполагая, что число оборотовъ и сила тока одни и тѣ же). Малый магнитъ подвижнѣе; кромѣ того, онъ обладаетъ вообще болѣе твердою закалкою, такъ что дольше сохраняетъ свое намагничиваніе, нежели большой. Отсюда уменьшеніемъ по возможности размѣровъ аппарата достигается двойная выгода. Тѣмъ же самымъ обезпечивается еще другой выигрышъ: число отдѣльныхъ оборотовъ и съ нимъ электромагнитное дѣйствіе могутъ быть значительно увеличены, тогда какъ *длина* проволоки, ослабляющей токъ своимъ сопротивленіемъ, при этомъ можетъ на самомъ дѣлѣ сдѣлаться меньше. Но всѣ наиболѣе существенныя черты гальванометровъ видны въ грубомъ аппаратѣ, представленномъ въ § 63.

65. Положимъ теперь, что къ намагниченному бруску съ одной стороны укрѣплено вертикально маленькое зеркало, и что на зеркало заставляютъ падать лучъ солнечнаго свѣта, который послѣ отраженія принимается на бѣлый экранъ. Каждое движеніе магнита тотчасъ же ука-

ывалось бы соответственнымъ движеніемъ свѣтлаго пятна на экранѣ. И чѣмъ дальше отъ аппарата стоитъ экранъ, тѣмъ больше будетъ передвиженіе пятна на одно и то же отклоненіе зеркала, т. е. магнита. Такимъ образомъ отклоненія, какъ бы малы они ни были, могутъ быть увеличены настолько, что станутъ видными даже очень большой аудиторіи. Это дѣлаетъ термоэлектрическій приемъ неоцѣнимымъ для лекціонныхъ опытовъ. И отсюда же прорастаетъ четвертая выгода, такъ какъ, чѣмъ меньше отклоненія магнита, тѣмъ ближе къ пропорціональности зависимость ихъ отъ силы тока.

При точныхъ измѣреніяхъ зеркальце дѣлается вогнутымъ и между нимъ и источникомъ свѣта вертикально устанавливается проволока на такомъ разстояніи, чтобы на экранѣ получалось отчетливое ея изображеніе. Оно то и служитъ вмѣсто расплывчатого свѣтового пятна указателемъ, который позволяетъ читать отклоненія при помощи шкалы изъ равныхъ частей, начерченной на экранѣ.

66. Разнообразные приемы, успѣшно примѣняемые для того, чтобы дѣлать гальванометры болѣе и болѣе чувствительными, относятся собственно къ области электричества, но здѣсь можетъ быть полезнымъ указаніе на нѣсколько наиболѣе важныхъ.

Зеркальце вмѣстѣ съ нѣсколькими очень маленькими полосками изъ твердой стали (намагниченными до насыщенія) которыя къ нему прикрѣплены, должно вѣсить не болѣе части грана. Оно подвѣшивается на *одномъ* *волокнѣ* некрученаго шелка. Обороты проволочной обмотки должны быть по возможности многочисленны и сколь возможно малаго діаметра, чтобы обезпечить наибольшее дѣйствіе (§ 64); но общее сопротивленіе проволоки

должно быть возможно мало — такъ какъ въ большинствѣ термоэлектрическихъ приспособленій, которыя намъ нужны для лучистой теплоты и т. п., *главное сопротивление* лежитъ въ обмоткѣ гальванометра. Поэтому слѣдуетъ брать лучшую мѣдь; проволока должна быть тонка настолько, чтобы можно было сдѣлать большое число оборотовъ малаго діаметра, но не настолько, чтобы этотъ выигрышъ уничтожался соотвѣтственно большимъ сопротивленіемъ ея и ослабленіемъ тока.



Рис. 6.

Въ очень чувствительныхъ инструментахъ съ большою пользою можетъ быть примѣнено также *астатическое* начало. Двѣ легкихъ иглы или группы иглъ устанавливаются параллельно другъ другу сѣверными полюсами въ прямо противоположныя стороны; середины иглъ соединяются тонкой алюминіевой проволокою, которая подвѣшивается вертикально на волокнѣ изъ некрученого шелка. Каждый магнитъ имѣетъ свою проводочную обмотку, и концы проволокъ соединены такъ, что (какъ показываетъ рисунокъ) токъ обходитъ обѣ обмотки въ противоположныхъ направленіяхъ. Поэтому, такъ какъ и направленіе тока, и направленіе сѣвернаго полюса—

оба обращаются при переходѣ отъ одной обмотки къ другой, то электромагнитныя дѣйствія будутъ направлены одинаково, между тѣмъ какъ земной магнетизмъ дѣйствуетъ на оба магнита въ противоположныхъ направлѣніяхъ. Если бы мы могли сдѣлать магнетные моменты обѣихъ иглъ въ точности равными и помѣстить ихъ магнитныя оси строго параллельно другъ другу, то земной магнетизмъ вовсе не оказывалъ бы дѣйствія на аппаратъ, и электромагнитному дѣйствию противодействовало бы и уравнивало бы его лишь крученіе шелкового волокна. Это практически неосуществимо; но направляющая сила земного магнетизма легко можетъ быть сведена къ $\frac{1}{100}$ всей ея величины и даже менѣе; такъ что этимъ приспособленіемъ достигается по меньшей мѣрѣ стократная чувствительность.

Какъ примѣръ достижимой такимъ образомъ чувствительности, можно привести то, что легко построить гальванометръ, который показывалъ бы $\frac{1}{1000}$ и даже $\frac{1}{10000}$ градуса Фарнгейта въ разности температуръ обѣихъ спаевъ мѣдно-железной цѣпи (§ 49) при обыкновенныхъ температурахъ.

67. Если гальванометръ долженъ быть употребляемъ и для сильныхъ, и для слабыхъ токовъ, то можно пользоваться различными приспособленіями; такъ, можно сдѣлать обмотку изъ двухъ или болѣе приблизительно одинаковыхъ частей и пускать въ дѣло или одну, или нѣсколько частей одновременно. Если взять двѣ и пропустить по нимъ токъ въ противоположныхъ направлѣніяхъ, то потребуется, очевидно, гораздо болѣе сильный токъ, чтобы произвести данное отклоненіе, чѣмъ при одинаковомъ направленіи тока въ обѣихъ частяхъ.

Другой приём состоитъ въ употребленіи снаружн аппарата магнитныхъ брусковъ, устанавливаемыхъ такъ или иначе, съ цѣлью увеличивать или уменьшать по желанію напряженность поля силы земного магнетизма. Этотъ приёмъ годится для сильныхъ токовъ, но не для слабыхъ, такъ какъ горизонтальная составляющая земного магнетизма постоянно и быстро измѣняется, и если большая часть ея нейтрализована, то даже легкая перемѣна можетъ произвести большое *процентное* измѣненіе въ неуравновѣшенной части, отъ которой только и зависитъ чувствительность гальванометра.

Большинство только что описанныхъ важныхъ усовершенствованій введены недавно В. Томсономъ (сперва въ телеграфной практикѣ). Еще одно, и отнюдь не меньшее, состоитъ въ помѣщеніи магнитовъ и зеркальца въ маленькую тѣсную стеклянную камеру съ параллельными стѣнками. Сопротивленіе воздуха, большая поверхность и малый моментъ инерціи зеркальца обуславливаютъ почти моментальную установку инструмента на его окончательный отчетъ, безъ продолжительныхъ и утомительныхъ колебаній, которыя были неизбѣжны въ прежнихъ инструментахъ. Это *начало успокоителей*, какъ его называютъ, позволяетъ наблюдателю дѣлать точные отчеты почти что скорѣе того, чѣмъ онъ успѣваетъ записывать ихъ; а тѣмъ самымъ достигается не только огромное сбереженіе времени и труда, но еще дается наблюдателю возможность изучить данное явленіе съ разныхъ сторонъ прежде, чѣмъ его условія успѣютъ ощутительно измѣниться,—вещь въ высшей степени желательная сама по себѣ, но которая лишь теперь стала возможною.

68. **Источники теплоты.**—Такъ какъ теплота есть лишь одна изъ многихъ формъ энергіи и такъ какъ вся-

кая форма энергіи вообще можетъ быть превращаема въполнѣ или частью въ другую, то источники теплоты столь же многочисленны, какъ формы энергіи, имѣющіяся въ нашемъ распоряженіи. Источникомъ полезной потенціальной энергіи для насъ является главнымъ образомъ топливо. Къ топливу слѣдуетъ отнести не только уголь, дерево и т. п., но также и все то, что можетъ быть названо горючимъ матеріаломъ: нинкъ, расходующійся въ гальванической батарее, наприимѣръ, и многіе другіе предметы этого рода, включая сюда пищу животныхъ.

Мы имѣемъ также:

обыкновенную силу воды;
силу морскихъ приливовъ;

въ кинетической формѣ мы имѣемъ:

вѣтры;
водяныя теченія, въ особенности океаническія;

горячіе источники и вулканы.

Мы знаемъ еще и другіе, очень незначительные источники, изъ которыхъ нѣкоторые совсѣмъ ничтожны, какъ напр. алмазы; но въ поименованныхъ заключаются всѣ для насъ важнѣйшіе. И каждый изъ нихъ можетъ быть сдѣланъ помощью надлежащихъ процессовъ источникомъ теплоты.

69. Теперь является вопросъ, каковы же источники этихъ самыхъ запасовъ энергіи? Ихъ можно распределить въ четыре группы.

Во-первыхъ, *первоначальное химическое сродство*, которое мы можемъ принять существовавшимъ между частичками матеріи съ первыхъ временъ и существующимъ еще и теперь, вслѣдствіе того, что эти частички

не соединились ни между собой, ни съ другимъ веществомъ. Напримѣръ, если въ то время, когда земля образовывалась изъ своихъ составныхъ частей паденіемъ ихъ другъ къ другу, нѣкоторыя частички метеорнаго желѣза и самородной сѣры не соединились между собою и остаются разъединенными и до сихъ поръ, то взаимная потенциальная энергія желѣза и сѣры остается для насъ, какъ часть первобытной энергіи вселенной. Но, сколько мы знаемъ, такихъ частицъ очень мало, по крайней мѣрѣ въблизи земной поверхности. Внутри земли могутъ быть еще огромныя массы свободнаго желѣза и свободной сѣры, но близъ поверхности, гдѣ они только и могли бы быть намъ непосредственно пригодными, ихъ количества ничтожно малы.

Второй источникъ, далеко превышающій въ изобиліи всѣ наши остальные, есть *солнечное излученіе*. Наконецъ, мы имѣемъ еще двѣ весьма поучительныхъ формы, *энергію вращенія земли вокругъ оси и внутреннюю теплоту земли*.

70. Если мы теперь сопоставимъ наши полезные запасы съ источниками, отъ которыхъ мы ихъ производимъ, то легко увидимъ, какъ тѣ и другіе между собой связаны.

Запасами топлива мы почти всецѣло обязаны солнцу. Въ давно прошедшія времена энергія солнечныхъ лучей, поглощаемая зелеными листьями растеній, разлагала углекислоту и запасала углеродъ. Этотъ углеродъ и различныя другія вещества, которыя въѣдами запасались вмѣстѣ съ нимъ, мы имѣемъ теперь какъ огромный запасный складъ каменнаго угля.

Пищею мы преимущественно обязаны солнцу, потому что пища животныхъ, даже плотоядныхъ, въ концѣ кон-

цовъ, растительнаго происхожденія. Мы обязаны солнцу и обыкновенной рабочей силою воды, потому что главнымъ образомъ солнечные лучи испаряютъ воду съ равнинъ и морей; сгустившись опять на высотѣ, вода пріобрѣтаетъ потенциальную энергію вслѣдствіе своего возвышеннаго положенія. Обыкновенныя водяныя теченія суть лишь превращенныя формы этой потенциальной энергіи, такъ какъ при своемъ теченіи съ высоты внизъ вода превращаетъ все бѣльшую и бѣльшую часть своей потенциальной энергіи въ кинетическую энергію видимаго движенія.

Но, переходя къ силѣ морскихъ приливовъ, мы вынуждены искать другого источника. Употребляя силу прилива для приведенія въ дѣйствіе какой-нибудь машины, мы беремъ воду во время прохода приливной волны. Мы запасаемъ нѣкоторое количество воды на известной высотѣ, выжидаемъ ухода волны и затѣмъ пользуемся паденіемъ запасенной воды. Если бы мы стали дѣлать это въ теченіе значительнаго періода времени и на большихъ береговыхъ протяженіяхъ, то мы бы нашли, что слѣдствіемъ этого было бы постепенное замедленіе вращательнаго движенія земли.

Вѣтры и океаническія теченія обязаны своимъ происхожденіемъ почти вполнѣ лучистой теплотѣ солнца. Горячіе же источники и вулканы—которые никогда не примѣнялись къ непосредственному производству работы—зависятъ, по крайней мѣрѣ преимущественно, отъ внутренней теплоты земли, частью же, можетъ быть, отъ потенциальной энергіи химическаго сродства.

71. Такимъ образомъ очевидно, что солнце является великимъ источникомъ почти всей нашей полезной энергіи. Мы можемъ повести наше изслѣдованіе еще на одинъ

шагъ дальше и задаться вопросомъ объ источникѣ огромнаго запаса энергіи самого солнца. Ниже мы увидимъ, что любой изъ извѣстныхъ намъ источниковъ химической энергіи достаточенъ для объясненія лишь ничтожной части энергіи солнца и что единственнымъ соразмѣрнымъ источникомъ является та потенциальная энергія, которую должны были обладать его части въ силу взаимнаго тяготѣнія, когда онѣ еще были разсѣяны на огромномъ пространствѣ, по меньшей мѣрѣ равномъ по размѣрамъ извѣстной намъ нынѣ солнечной системѣ.

72. Передача теплоты.—Къ этому отдѣлу принято относить тѣ три пути, какими теплота можетъ передаваться отъ одного мѣста къ другому, именно процессы

проводимости теплоты	
излученія	»
переноса	»

Какъ мы тотчасъ увидимъ, въ этомъ перечнѣ есть иѣкоторая неопредѣленность, ибо, понимаемый общепринятымъ образомъ, онъ заключаетъ или слишкомъ много, или слишкомъ мало.

73. Подъ проводимостью теплоты мы обыкновенно понимаемъ сравнительно медленную передачу теплоты отъ одной части тѣла къ другой или отъ одного тѣла къ другому, съ которымъ оно непосредственно соприкасается. Преимущественно этимъ путемъ часть внутренней теплоты земли достигаетъ поверхности, и солнечное тепло проникаетъ въ земную кору. Изученіе законовъ проводимости теплоты и относительной проводящей способности различныхъ веществъ, также какъ проводящей способности одного и того же вещества при разныхъ температурахъ, имѣетъ очень большое практическое значеніе и высокій научный интересъ.

Подъ *излученіемъ теплоты* (лучеиспусканіемъ) мы обыкновенно подразумѣваемъ процессъ передачи теплоты отъ одного тѣла къ другому со скоростью свѣта—даже черезъ пространство, вполнѣ лишенное того, что называютъ осязаемой матеріей. Теплоту отъ солнца и (въ гораздо меньшемъ количествѣ) отъ другихъ свѣтилъ мы получаемъ единственно путемъ излученія. Область явленій лучеиспусканія и связанная съ нею область явленій поглощенія неожиданно получили въ послѣднее время огромное развитіе. Приѣмъ *спектральнаго анализа*, къ которому онѣ не такъ давно привели, является для насъ однимъ изъ самыхъ важныхъ средствъ изслѣдованія какъ отдаленнѣйшихъ звѣздныхъ системъ и туманностей, такъ и почти невообразимо тонкаго зернистаго строенія матеріи.

Подъ *переносомъ теплоты* (конвекціей) обыкновенно разумѣютъ передачу тепловой энергіи отъ одного мѣста къ другому *вмѣстѣ съ тѣми* отдѣльными частями матеріи, съ которыми эта энергія связана. Гольфстремъ есть большой потокъ этого рода, которымъ тропическая теплота солнца переносится въ сѣверный Атлантическій океанъ. Каждый родъ вентиляціи, будь то въ уольныхъ коняхъ или въ жилыхъ домахъ—по крайней мѣрѣ, если вентиляція непосредственно производится теплотою—есть лишь случай переноса теплоты.

74. Дабы избѣжать того, что могло бы смутить учащагося своей новизною, хорошо будетъ придерживаться въ этой *элементарной* книгѣ только что данной классификаціи. Но можетъ быть небезполезно сдѣлать здѣсь по ея поводу одно или два замѣчанія.

Прежде всего мы не имѣемъ рѣшительно никакихъ доказательствъ, чтобы солнечные лучи, во время при-

хожденія ихъ черезъ междупланетное пространство, были одною изъ тѣхъ формъ энергій, которыя мы называемъ теплотою. Что излученіе солнца представляетъ форму энергій и зависитъ отъ особаго рода колебательнаго движенія среды—на то имѣется полное доказательство. Но надо полагать, что мы имѣемъ не больше права называть его теплотою, чѣмъ называть теплотою электрическій токъ: ибо хотя электрическій токъ есть возможная форма превращенной тепловой энергій и хотя токъ можетъ быть обращенъ снова въ теплоту, — самый токъ не принято однако считать теплотою. Точно также энергія луча есть превращенная энергія теплоты горячаго тѣла и можетъ быть снова превращена въ теплоту, но на своемъ пути черезъ пространство, не содержащее осязаемой матеріи, и даже во время прохожденія (безъ поглощенія) черезъ осязаемую матерію, эта энергія не есть необходимо *теплота*.

Далѣе, при изученіи термоэлектричества мы увидимъ, что электрическій токъ совершаетъ переносъ теплоты, т. е. что, проходя по металлическому стержню, котораго температура въ разныхъ точкахъ неодинакова, онъ можетъ переносить теплоту отъ горячихъ частей къ болѣе холоднымъ или наоборотъ; если же токъ проходитъ по цепи, составленной изъ двухъ металловъ, которыхъ температура повсюду одинакова, то онъ уноситъ теплоту изъ одного спая и отдаетъ ее другому.

Эти факты дѣлаютъ обычную строгую классификацію § 72 нѣсколько неполной; но, не останавливаясь на этомъ долѣе, мы лишь скажемъ, что кажушіяся исключенія легко могутъ быть рассмотрѣны въ отнѣсіи о *превращеніи* *теплоты*, какъ будетъ видно, когда мы представимъ различныя подраздѣленія нашего предмета болѣе полно.

Здѣсь мы имѣемъ явный случай нѣсколько непослѣдовательнаго изложенія; но, какъ уже было объяснено (§ 11), мы рѣшились принять его, такъ какъ иначе мы скорѣе спутали бы начинающаго, чѣмъ помогли ему. Учащійся, прошедшій успѣшно первыя ступени, легко преодолѣтъ и эту трудность.

75. Превращенія теплоты.—Превращенія теплоты, конечно, столь же многочисленны, какъ остальные формы энергій, ибо мы уже видѣли, что каждая форма энергій можетъ быть превращаема (по крайней мѣрѣ частью) въ каждую другую. Здѣсь нѣтъ надобности говорить еще что-либо по этому поводу. Но есть другая въ высшей степени важная сторона дѣла. Мы можемъ высказать ее такъ:

Дано опредѣленное количество энергій въ извѣстной формѣ и при данныхъ условіяхъ. Какая часть этого количества можетъ быть превращена помощью аппарата даннаго рода въ какую-либо другую опредѣленную форму? и сохраняетъ-ли остатокъ прежнюю форму или же превращается вполнѣ или частью въ нѣкоторую третью форму энергій?

76. Каждый знакомъ хотя отчасти съ огромной тратой, имѣющей мѣсто въ обыкновенной паровой машинѣ. Не говоря уже о негорѣвшей части топлива, улетающей въ видѣ дыма, самое поднятіе дыма на значительную высоту обусловлено тратой тепла; постоянная и большая потеря происходитъ также съ наружной стороны топки, парового котла и цилиндровъ. Уже тотъ фактъ, что у самой машины, гдѣ стоитъ кочегаръ, такъ невыносимо жарко, указываетъ на эту трату. Но эта трата столь же неизбежна, какъ и не нужна. Доказано, что въ самой лучшей машинѣ, даже если бы она была

теоретически совершенна и работала бы въ обыкновенныхъ предѣлахъ температуръ,—изъ всей дѣйствительно употребленной теплоты только около одной четверти — очень рѣдко столько, но въ лучшемъ случаѣ около четверти — превращается въ работу; это значить, что три четверти всего угля, или три четверти употребленной теплоты совершенно теряются при самыхъ благоприятныхъ обстоятельствахъ. Чѣмъ же это обусловлено? Почему можно данное количество работы или потенціальной энергіи всецѣло превратить въ теплоту, между тѣмъ какъ теплота только отчасти можетъ быть опять превращена въ высшую форму работы или потенціальной энергіи?

77. Весь отвѣтъ заключается въ томъ, что употребленномъ словѣ «высшій». Когда энергія должна быть превращена изъ высшей формы въ низшую, процессъ можетъ быть совершенъ вообще во всей его полнотѣ; но когда дѣло касается обратнаго превращенія — при подъемѣ вверхъ, какъ въ нашемъ случаѣ — тогда лишь часть, вообще малая часть низшаго рода энергій (даже при самыхъ благоприятныхъ условіяхъ) можетъ быть снова возведена въ высшую форму. Вся остающаяся энергія обыкновенно падаетъ еще ниже во время процесса. Если энергія уже имѣетъ низкую форму и часть ея должна быть повышена и превращена въ энергію болѣе высокаго порядка, то значительная часть ея — вообще болѣе большая часть — необходимо должна упасть еще ниже.

Это положеніе есть одно изъ важнѣйшихъ приобретений когда-либо сдѣланныхъ наукою; оно изумительнымъ образомъ связано съ будущностью цѣлой видимой вселенной.

78. Опытъ показываетъ намъ, что при всѣхъ превращеніяхъ энергіи замѣчается стремленіе къ переходу отъ полезной энергіи къ другимъ стоящимъ ниже формамъ—такъ что при неизмѣнномъ количествѣ, качество энергіи становится ниже и полезность ея меньше; такимъ образомъ мы имѣемъ право высказать принципъ разсѣянія энергіи—что давно и сдѣлано Вильямомъ Томсономъ послѣ того, какъ новыя идеи получили свое полное развитіе.

79. Принципъ разсѣянія, или—быть можетъ лучше—принципъ пониженія (degradation) энергіи состоитъ просто въ томъ, что такъ какъ каждый совершающійся въ природѣ процессъ связанъ съ превращеніемъ энергіи, а каждое превращеніе энергіи влечетъ за собою пониженіе нѣкоторой ея части (разумѣя подъ пониженной энергіей такую, которая менѣе, чѣмъ прежде, способна къ превращеніямъ), то въ цѣломъ энергія становится все менѣе и менѣе превратимой.

80. Такимъ образомъ до тѣхъ поръ, пока въ природѣ совершаются измѣненія, энергія вселенной падаетъ ниже и ниже, и мы тотчасъ же можемъ видѣть, какова должна быть ея конечная форма, по крайней мѣрѣ, насколько простираются теперешнія наши знанія. Ея конечною формою должна быть теплота, распределенная такъ, чтобы всѣ тѣла имѣли одинаковую температуру. Будетъ ли то высокая или низкая температура — это безразлично, потому что, разъ теплота распределена такъ, что всѣ тѣла приняли однообразную температуру, она находится въ состояніи, изъ котораго уже не можетъ опять подняться выше. Чтобы производить теплоту какую-нибудь работу, безусловно необходимо имѣть болѣе теплое тѣло и болѣе холодное. Когда, слѣдова-

тельно, вся энергія вселенной превратится въ теплоту и распредѣлится такъ, что всё тѣла будутъ нагрѣты до одной и той же температуры, тогда невозможно будетъ—по крайней мѣрѣ помощью какого бы то ни было нынѣ извѣстнаго или даже мыслимаго процесса — повысить хотя часть этой энергіи въ болѣе полезную форму. *Почему* это такъ и *какія* (малыя) исключенія допускаетъ сказанное общее положеніе — это представить важный предметъ для разсмотрѣнія впослѣдствіи. Для нашей настоящей цѣли мы можемъ считать его за совершенно общій законъ природы.

81. Является такимъ образомъ важный вопросъ: *до какихъ предѣловъ могутъ быть совершаемы эти превращенія?*—вопросъ, который можетъ быть, конечно, разрѣшенъ не иначе, какъ опытомъ или же разсужденіемъ, основаннымъ въ концѣ концовъ на опытѣ. И вопросъ этотъ, по крайней мѣрѣ, по скольку онъ касается превращенія теплоты въ работу и различныхъ родственныхъ превращеній, разрѣшенъ самымъ блестящимъ и удовлетворительнымъ образомъ.

82. Быть можетъ, ни одна чисто физическая идея не способствовала въ такой мѣрѣ упрощенію науки и не повела къ столь многимъ поразительнымъ и новымъ прозрѣніямъ (которыя потомъ оправдались на опытѣ), какъ понятіе Карно о *круговомъ процессѣ* и его позднѣйшая идея объ *обратимомъ круговомъ процессѣ*.

Результатомъ этой идеи явились: рациональный способъ опредѣленія соотношенія между теплотою, затраченною въ машинѣ, и доставляемой ею работой; критерій степени совершенства тепловой машины; абсолютное опредѣленіе температуры; открытіе вліянія давленія на точку плавленія и безчисленное множество важныхъ со-

отношеній между свойствами вещества и энергіей при разнообразныхъ обстоятельствахъ. Все это въ значительной мѣрѣ входитъ въ положеніе, составляющее

Второй законъ термодинамики. — Если машина имѣетъ то свойство, что при обратномъ ея ходѣ всѣ физическія и механическія дѣйствія въ каждой изъ ея движущихся частей обращаются (см. § 89), то она производитъ столько механическаго дѣйствія, сколько можетъ быть произведено какою бы то ни было другою термодинамическою машиною изъ данного количества теплоты при тѣхъ же температурахъ теплового источника и холодильника.

83. Слѣдуетъ въ особенности отмѣтить то, что обратимость (§§ 88 и 89) есть единственный признакъ совершенства машины. Въ законѣ ничего не сказано также о томъ, чтобы работа обратимой тепловой машины зависѣла отъ природы работающаго вещества; температуры теплового источника и холодильника и количество затрачиваемой теплоты—единственныя условія, опредѣляющія количество работы, которое можетъ быть произведено машиною. Нельзя переоцѣнить важности этихъ положеній, какъ по отношенію къ существующимъ машинамъ, такъ и тѣмъ, которыя могутъ быть проектированы.

84. Сочиненіе Карно разсматриваетъ *движущую силу теплоты* и опубликовано въ 1824 году. Немалую часть научныхъ заслугъ В. Томсона составляетъ то, что онъ въ надлежащій моментъ понялъ все значеніе этой совершенно забытой книги и обратилъ на нее вниманіе ученыхъ въ 1848 году, указавъ, между прочимъ, что она даетъ намъ впервые возможность *абсолютнаго опредѣленія температуры*. Хотя Карно (повидимому

противъ своихъ собственныхъ убѣжденій) разсуждаетъ въ предположеніи, что теплота есть вещество и поэтому неуничтожаема, и хотя вълѣдствіе этого нѣкоторые изъ его изслѣдованій не вполне вѣрны, тѣмъ не менѣе трудъ его имѣетъ неопѣнимое значеніе, такъ какъ онъ далъ намъ не только правильную основу для теоретическихъ выводовъ, но еще совершенно новый и чрезвычайно могущественный физическій методъ, который позволяетъ намъ тотчасъ же примѣнить математическое разсужденіе ко всѣмъ вопросамъ этого рода.

Итакъ, двѣ великія заслуги Карно состоятъ въ томъ, что онъ, во-первыхъ, поставилъ термодинамику на самостоятельное физическое и опытное основаніе; во-вторыхъ, далъ намъ по отношенію къ этой области совершенно новый въ математической физикѣ способъ разсужденія, который оказался не только въ рукахъ Карно, но и въ рукахъ многихъ его послѣдователей, столь же плодотворнымъ въ новыхъ открытіяхъ, какъ самая идея о сохраненія энергіи.

85. Для того, чтобы судить о работѣ тепловой машины (возьмемъ для простоты паровую машину), мы должны представить себѣ рядъ такихъ дѣйствій, въ концѣ которыхъ паръ или вода приводились бы въ то же самое состояніе, какъ въ началѣ. Карно называетъ такой рядъ дѣйствій круговымъ процессомъ и утверждаетъ, что только для такого процесса мы имѣемъ право разсуждать объ отношеніи между количествами произведенной работы и затраченной теплоты. Если бы мы нѣкоторому количеству пара дали возможность только расширяться, причемъ онъ терялъ бы теплоту и производилъ работу, то мы отнюдь не имѣли бы права сказать, что количество исчезнувшей теплоты эквивалентно

произведенной работѣ, такъ какъ подъ конецъ операціи паръ находится въ иныхъ условіяхъ давленія и температуры—въ другомъ состояніи—чѣмъ въ началѣ. Сперва онъ былъ, положимъ, насыщеннымъ паромъ извѣстной температуры; подъ конецъ операціи, при надлежащихъ приспособленіяхъ, онъ можетъ остаться насыщеннымъ, но его температура необходимо будетъ иная, и вслѣдствіе этого мы не имѣемъ права считать, что паръ содержитъ то же количество внутренней энергіи, какъ въ начальномъ состояніи. Мы не имѣемъ никакого права сравнивать количество теплоты, которое кажется исчезнувшимъ, съ количествомъ произведенной работы, если работающее вещество начинаетъ однимъ состояніемъ и кончаетъ другимъ. Но если бы намъ удалось какимъ-либо образомъ привести работающее вещество опять въ его начальное состояніе, то мы имѣли бы право утверждать, что въ немъ должно содержаться ни болѣе, ни менѣе энергіи, чѣмъ въ началѣ, и тогда, конечно, мы были бы въ правѣ разсуждать и о всѣхъ внѣшнихъ дѣйствіяхъ, происходившихъ въ теченіе процесса—опредѣлять условія эквивалентности между ними.

86. Воображаемый процессъ, введенный Карно съ цѣлью правильнаго заключенія, крайне простъ — *когда онъ найденъ*, какъ это бываетъ съ большинствомъ великихъ идей.

Представимъ себѣ два тѣла, поддерживаемыхъ каждое постоянно при опредѣленной температурѣ. Мы будемъ соответственно называть ихъ одно—теплымъ тѣломъ, другое—холоднымъ. Въ дополненіе къ нимъ представимъ себѣ еще тѣло, которое по отношенію къ другимъ ни тепло, ни холодно, вслѣдствіе того, что оно неспособно поглощать или отдавать теплоту—непровод-

никъ теплоты. Положимъ, что стѣнки работающаго цилиндра и поршень не проводятъ теплоту, а дно цилиндра есть совершенный проводникъ теплоты. Пусть въ цилиндрѣ будетъ нѣкоторое количество воды и пара при температурѣ холоднаго тѣла. 1) Помѣстимъ сперва цилиндръ на непроводникъ и затратимъ работу, вдавливая поршень: содержимое цилиндра сдѣлается теплѣе и въ то же время часть пара стусится въ жидкость. Будемъ продолжать это до тѣхъ поръ, пока температура не повысится до температуры теплаго тѣла; тогда 2) перенесемъ цилиндръ на теплое тѣло. Дадимъ теперь поршню подыматься ¹⁾; содержимое остается при температурѣ теплаго тѣла, образуется новое количество пара и производится работа. Остановимъ этотъ процессъ въ *любой* моментъ и 3) перенесемъ цилиндръ на непроводникъ. Если мы дадимъ содержимому расширяться далѣе, то будетъ произведена еще работа, а температура въ цилиндрѣ будетъ постепенно падать. Продолжимъ этотъ процессъ до тѣхъ поръ, пока температура не понизится до температуры холоднаго тѣла; тогда можно будетъ безъ потери теплоты 4) перенести цилиндръ на холодное тѣло. Теперь, прилагая работу, сожмемъ, при постоянной температурѣ холоднаго тѣла, содержимое настолько, чтобы оно (черезъ сжатіе) сдѣлалось совершенно тѣмъ же, какимъ было въ началѣ. Цилиндръ можетъ быть теперь опять перенесенъ на непроводящую подставку—и все придетъ въ первоначальное состояніе, но нѣсколько теплоты было взято отъ

¹⁾ Это можно сдѣлать, постепенно уменьшая грузъ, лежащій на поршнѣ и служащій для уравновѣшенія давленія пара.

теплаго тѣла во второй операціи и нѣсколько теплоты было отдано холодному тѣлу въ четвертой. Очевидно также, что въ теченіе второй и третьей операціи было произведено больше работы, чѣмъ затрачено въ теченіе первой и четвертой, ибо температура и, слѣдовательно, давленіе содержимаго были больше при расширеніи, нежели при сжатіи. Всѣ эти операціи, конечно, могутъ быть повторены любое число разъ.

87. Обратимъ особенное вниманіе на отличительную черту кругового процесса. Паръ или другое расширяющееся вещество, каково-бы оно ни было (воздухъ или что-либо иное одинаково годилась бы), должно быть постоянно въ соприкосновеніи или съ тѣлами его собственной температуры, или съ непроводниками теплоты. Если-бы оно приходило въ соприкосновеніе съ тѣломъ низшей температуры, то была-бы потеря теплоты. Теплота передавалась бы отъ цилиндра путемъ проводимости внѣшнимъ тѣламъ и, слѣдовательно, терялась-бы для работы. То же самое бы случилось, если бы цилиндръ былъ снятъ съ непроводящаго тѣла и помѣщенъ на холодное прежде, чѣмъ содержимому было дано расшириться настолько, насколько это нужно для охлажденія его до температуры холоднаго тѣла: тогда нѣсколько теплоты было бы тотчасъ отведено и потерялась бы для машины. Итакъ, для кругового процесса Карно существенно, чтобы во всемъ ряду операцій не было прямой передачи теплоты, кромѣ тѣхъ двухъ случаевъ, когда теплота принимается отъ теплаго тѣла и когда она отдается холодному. Но въ обоихъ этихъ случаяхъ температура содержимаго въ цилиндрѣ равна температурѣ того тѣла, съ которымъ цилиндръ въ данный моментъ находится въ соприкосновеніи.

88. Перейдемъ теперь къ другому обстоятельству также совершенно новому и чрезвычайно важному. Предположимъ, что отдѣльные дѣйствія въ круговомъ процессѣ Карно совершаются въ обратномъ порядкѣ. Начнемъ, напримѣръ, съ теплаго тѣла, но не дадимъ здѣсь поршню подыматься. Снимемъ цилиндръ съ теплаго тѣла, когда вода и паръ подъ поршнемъ приняли температуру этого теплаго тѣла. Помѣстимъ цилиндръ на проводникъ, и тогда дадимъ поршню подыматься. Пусть онъ подымается, все время совершая работу, пока его температура не понизится до температуры холоднаго тѣла; тогда помѣстимъ цилиндръ на холодное тѣло и дадимъ пару расширяться далѣе: онъ будетъ теперь производить работу, принимая теплоту. Когда поршень поднялся до своего прежняго высшаго положенія, мы ставимъ цилиндръ опять на непроводящее тѣло и вдавливаемъ поршень настолько, насколько онъ былъ поднятъ, когда (въ прямомъ ряду операций Карно) цилиндръ былъ помѣщенъ на это тѣло въ 3-й операціи прямого процесса.

Всѣ дѣйствія совершались въ точности обратно тому, что было прежде. Закончимъ процессъ, поставивъ цилиндръ на теплое тѣло и вдавливая поршень до его начальнаго положенія. При этомъ заключительномъ дѣйствіи теплому тѣлу отдается вся теплота, которая была взята отъ холоднаго тѣла. Но здѣсь поршень въ теченіе двухъ первыхъ дѣйствій былъ въ соприкосновеніи съ паромъ низшей температуры и, слѣдовательно, меньшаго давленія, чѣмъ въ послѣднихъ двухъ. Поэтому при обращенномъ дѣйствіи машины въ общемъ должна быть затрата работа для того, чтобы заимствованную отъ холоднаго тѣла теплоту перенести на теплое тѣло.

89. Таковы были великія идеи, введенныя Карно. Двѣ

ихъ отличительныя черты суть, *во-первыхъ*, понятіе о полномъ круговомъ процессѣ, къ концу котораго работающее вещество, каково бы оно ни было, опять приводится въ точности въ свое начальное состояніе; этотъ круговоротъ можетъ быть повторяемъ неопредѣленное число разъ. *Во-вторыхъ*, мысль сдѣлать круговой процессъ обратимымъ—такъ, чтобы всѣ дѣйствія могли быть совершены въ обратномъ порядкѣ. Это значить, что вмѣсто сообщенія теплоты въ извѣстный моментъ будетъ отдача ея; вмѣсто того, чтобы машина въ извѣстный моментъ давала работу, работа будетъ затрачиваться на машину. Вмѣстѣ съ обращеніемъ каждой части и весь процессъ происходитъ въ обратномъ направленіи.

90. Разсматривая теплоту, какъ матеріальное начало, Карно говоритъ, что въ прямомъ круговомъ процессѣ работа производится вслѣдствіе паденія температуры съ высшей на низшую точно такъ, какъ вода производитъ работу при своемъ паденіи черезъ турбину или другой водяной двигатель, и эта работа пропорціональна количеству падающей воды и высотѣ, съ которой вода падаетъ. Въ обращенномъ процессѣ работа затрачивается какъ бы для накачиванія теплоты изъ холоднаго тѣла опять въ теплое. Здѣсь, конечно, предполагается, что количество теплоты, достигающее холодильника, равно тому, которое отдается паровымъ котломъ, т. е. собственно, что теплота есть *матерія* и потому неизмѣняема въ количествѣ. Нынѣ мы знаемъ, что такой взглядъ на природу теплоты невѣренъ; но заключеніе Карно не теряется вслѣдствіе этого своей цѣнны, такъ какъ требуется измѣнить лишь одно или два слова, чтобы согласовать его съ нашими новѣйшими знаніями.

91. Одно обстоятельство уже доказываетъ рѣшитель-

нымъ образомъ, что аналогія Карно (не его результатъ) была ошибочна, именно то, что нѣтъ ничего легче, какъ устроить дѣло такъ, чтобы теплота переходила отъ теплаго тѣла къ холодному, не производя никакой работы. Стоитъ только теплое тѣло привести въ прямое соприкосновеніе съ холоднымъ—и тогда то же самое количество теплоты перейдетъ отъ одного къ другому, между тѣмъ какъ никакой работы при этомъ не будетъ произведено. Прежде, чѣмъ дать правильную постановку заключающагося здѣсь вопроса, можетъ быть полезно пополнивъ этотъ краткій отчетъ о трудахъ Карно по отношенію къ данной задачѣ. Ибо, даже со своимъ ложнымъ представленіемъ о природѣ теплоты, онъ сдѣлалъ больше, чѣмъ до сихъ поръ сказано. Намъ слѣдуетъ теперь показать, *почему* Карно ввелъ понятіе объ обратимости. Вотъ что собственно онъ говоритъ: если машина обратима (какъ показано относительно кругового процесса), то она даетъ столько работы, сколько можетъ быть вообще произведено изъ даннаго количества теплоты при тѣхъ же данныхъ условіяхъ. Такъ что — каково бы ни было вещество, которое расширяется и сжимается—если опредѣленное количество теплоты падаетъ черезъ обратимую машину отъ источника опредѣленной температуры до другой низшей опредѣленной температуры, то количество полезной работы, которое можно получить изъ этой теплоты, будетъ совершенно одно и то же.

Обратимость есть такимъ образомъ единственно необходимымъ условіемъ равенства полезнаго дѣйствія двухъ паровыхъ машинъ. Это положеніе составляетъ огромный шагъ впередъ въ физической наукѣ. Заключение совершенно не зависитъ отъ свойствъ какого бы то ни было вещества. Будутъ ли работающимъ веществомъ паръ,

воздухъ, эфиръ и т. д., рѣшающій признакъ степени совершенства машины остается тотъ же самый. Вотъ этотъ признакъ: *если тепловая машина обратима, то она совершенна* — совершенна не въ обыденномъ, а въ научномъ смыслѣ слова, т. е. *она настолько хороша, насколько это физически возможно.*

92. Карно обнаруживаетъ это свойство посредствомъ простого приведенія къ нелѣпости (*reductio ad absurdum*) совершенно аналогичнаго тому, какое примѣнялось въ § 20. Онъ говоритъ, что обратимая машина совершенна, ибо если это не такъ, то предположимъ, что есть другая, болѣе совершенная, и заставимъ обѣ машины работать совмѣстно. Пусть болѣе совершенная машина будетъ употреблена на то, чтобы получаемую ею теплоту передавать отъ парового котла холодильнику и вслѣдствіе этого производить работу болѣе чѣмъ та, которую на то же количество теплоты могла бы доставить обратимая машина. Потребная для первой машины теплота можетъ быть получена, т. е. *поднята* съ холоднаго тѣла, помощью обратимой машины, и на это пойдетъ только часть работы, доставленной болѣе совершенною машиною. Такимъ образомъ всякій разъ, какъ теплота будетъ падать съ высшаго уровня (высшей температуры) на низшій,—это будетъ совершаться черезъ посредство первой машины, подъемъ же теплоты будетъ производить обратимая машина. А отсюда слѣдуетъ, что наша сложная система изъ двухъ машинъ будетъ доставлять работы болѣе, чѣмъ расходовать. Такимъ образомъ мы имѣли бы машину, которая не только двигалась бы вѣчно, но могла бы постоянно, нисколько не истощивъ своего источника, производить работу надъ внѣшними тѣлами.

Подобное слѣдствіе, какъ мы видѣли (§ 20), противорѣчитъ всѣмъ опытнымъ даннымъ, а потому и приводящее къ нему предположеніе—т. е. что возможна машина болѣе совершенная, нежели обратимая, — необходимо должно быть ложнымъ.

Таково доказательство, данное Карно (въ предположеніи матеріальности теплоты), что обратимая машина есть машина совершенная. Требуется лишь очень немного, какъ показываетъ минутное размышленіе, чтобы согласовать заключеніе Карно съ современными свѣдѣніями о теплотѣ.

93. Намъ слѣдуетъ теперь рассмотретьъ круговой процессъ при освѣщеніи его началомъ сохраненія энергии, т. е. принять во вниманіе, что если работа производится теплотою, то часть этой теплоты должна исчезнуть въ процессѣ. Слѣдовательно, ни при какихъ обстоятельствахъ—если только машина производитъ вѣщную работу — количество теплоты, достигающее холодильника, не можетъ равняться тому, которое отдается котломъ. Если нѣсколько теплоты не теряется путемъ проводимости или другимъ непроизводительнымъ образомъ, то разность между количествомъ теплоты, которое отдается источникомъ и тѣмъ, которое достигаетъ холодильника въ теченіе полнаго кругового процесса, должна быть въ точности эквивалентна произведенной вѣщной работѣ. Принявъ это въ расчетъ, предположимъ, что мы могли бы построить машину болѣе совершенную, чѣмъ обратимая. Пусть обѣ машины опять работаютъ вмѣстѣ, какъ прежде. Сдѣлаемъ такъ, чтобы обратимая машина постоянно восполняла ту теплоту, которую беретъ отъ источника другая машина. Такъ какъ первая менѣе совершенна, то при своемъ обратномъ дѣйствіи

(для восполненія теплоты, расходуемой источникомъ или котломъ на первую машину), она потребуетъ менѣе работы, чѣмъ доставляется второю машиною. Слѣдовательно, такъ какъ приходъ и расходъ теплоты покрываютъ другъ друга, въ цѣломъ—по крайней мѣрѣ, по отношенію къ источнику теплоты—мы выгадываемъ въ работѣ. Но тепловая машина, какъ бы она сложна ни была, можетъ работать лишь затрачивая теплоту, и если наше приспособленіе не беретъ тепла отъ котла, то оно должно получать его отъ *холодильника*. Этотъ результатъ сводится къ тому, что, если бы мы взяли какъ холодильникъ для предположенной выше сложной машины какую нибудь ограниченную часть доступной намъ вселенной, то машина продолжала бы доставлять работу до тѣхъ поръ, пока вся теплота этой части вселенной не была бы ею исчерпана. Можно съ увѣренностью принять за аксіому, что это недостижимо; всѣ опытные факты говорятъ противъ. Мы такимъ образомъ *ex absurdo* приходимъ къ положенію, что не можетъ быть машины болѣе совершенной, чѣмъ обратимая. Вопросъ этотъ болѣе подробно будетъ разсмотрѣнъ въ одной изъ дальнѣйшихъ главъ.

94. Такъ какъ всѣ обратимыя машины совершенны, то всѣ онѣ равны по своему полезному дѣйствию, т. е. всѣ онѣ даютъ точно то же самое количество работы изъ даннаго количества теплоты при тѣхъ же условіяхъ; поэтому эти-то условія и опредѣляютъ, какое количество работы можетъ быть произведено совершенною машиною изъ даннаго количества теплоты. Но одинаковыми условіями въ различныхъ совершенныхъ машинахъ могутъ быть единственно температуры котла и холодильника. Поэтому, при однѣхъ и тѣхъ же температурахъ котла и

и холодильника, всё машины, израсходовавши одно и то же количество теплоты, дадут одно и то же количество работы. Другими словами, всё совершенныя тепловыя машины превращаютъ въ работу при одинаковыхъ условіяхъ одну и ту же часть всей употребленной теплоты, и величина дробы зависитъ исключительно отъ взятыхъ температуръ. Отсюда прямо вытекаетъ Томсоновскій абсолютный способъ измѣренія температуры (см. выше § 82). Ибо очевидно, что этою дробью можно выразить отношеніе между температурами котла и холодильника.

95. Самый способъ опредѣленія до извѣстной степени произволенъ. Томсонъ окончательно установилъ это опредѣленіе такъ, чтобы сдѣлать возможно полнымъ согласіе между новой шкалой и шкалой обыкновеннаго воздушнаго термометра и, слѣдовательно, достичь того, чтобы введеніе этого метода опредѣленія температуръ, единственно научнаго, произвело сколь возможно малое нарушеніе прежнихъ соглашеній по этому предмету. Основанія къ такому особенному выбору будутъ сполна объяснены позже. Пока мы просто дадимъ опредѣленіе словами Томсона:

«Температуры двухъ тѣлъ пропорціональны количествамъ теплоты, принимаемой и отдаваемой матеріальною системою въ двухъ мѣстахъ, имѣющихъ эти самыя температуры — когда система подвержена полному круговому процессу совершенно обратимыхъ термодинамическихъ дѣйствій и защищена отъ потери или принятія теплоты при какой-либо иной температурѣ; или: абсолютныя значенія двухъ температуръ относятся другъ къ другу, какъ количества теплоты, принятой и отданной совершенной термодинамической

машинною, работающей при тепловомъ источникѣ и холодильникѣ, которые имѣютъ температуры соответственно равныя высшей и низшей даннымъ температурамъ» *).

96. Пусть мы имѣемъ тѣло, поддерживаемое при температурѣ кипѣнія воды, подъ условіемъ, чтобы высота барометра равнялась 30 дюймамъ (см. выноску § 61), и еще другое тѣло, поддерживаемое при температурѣ таянія льда при той же высотѣ барометра. Положимъ, мы могли-бы измѣрить количества теплоты, принимаемой и отдаваемой совершенною машиной, работающей въ предѣлахъ этихъ двухъ температуръ; названныя количества, какъ будетъ показано позже, оказались-бы стоящими въ отношеніи близкомъ къ $374:274$. Эти именно числа приняты для выраженія отношенія, потому что ихъ разность равняется 100. Въ обыкновенной стоградусной шкалѣ мы называемъ температуру замерзанія нулемъ, а температуру кипѣнія воды при 30 дюймахъ атмосфернаго давленія называемъ 100° . Такъ какъ мы нашли путемъ опыта, что въ названномъ выше случаѣ 374 принято и 274 отдано, то температура кипящей воды по этой шкалѣ будетъ изображаться 374 градусами, температура замерзанія воды или таянія льда 274 градусами; промежутокъ между ними равняется 100° , какъ въ обыкновенной стоградусной шкалѣ. Отсюда любопытное и весьма важное слѣдствіе, что тѣло, охлажденное на 274° стоградусной шкалы ниже нуля, совершенно лишено теплоты. Этотъ предѣлъ, который обыкновенно называется «абсолютнымъ нулемъ температуры», быть можетъ, правильнѣе было-бы назвать «нулемъ абсолют-

*) *Trans. R. S. E.*, May 1854.

ной температуры». И очевидно, что температура тѣла не можетъ быть сдѣлана болѣе низкою, чѣмъ эта.

97. Учащемуся мы совѣтуемъ вполне овладѣть понятіями, изложенными въ нашемъ краткомъ очеркѣ. Это облегчить ему дальнѣйшее пониманіе отношеній между различными частями нашего обширнаго предмета. Вмѣстѣ съ тѣмъ учащемуся станетъ понятно, почему при болѣе подробномъ изложеніи, которое слѣдуетъ далѣе, необходимо будетъ постоянно заходить впередъ, заимствуя матеріалы изъ позднѣйшихъ главъ.

98. *Содержаніе §§ 42—97.* Температура есть не что иное, какъ условіе теплого состоянія въ тѣлѣ. Наибольшая часть даннаго количества теплоты, какая можетъ быть превращена въ полезную работу, зависитъ только отъ температуры тѣла, съ которымъ эта теплота связана, и отъ низжайшей достижимой температуры. Неопѣнимая научная заслуга Карно состоитъ въ его мысли о *круговомъ процессѣ* и особенно въ *обратимомъ круговомъ процессѣ*, какъ мѣрилѣ степени совершенства машины. *Второй законъ термодинамики* и абсолютное измѣреніе температуры.

ГЛАВА V.

Расширеніе твердыхъ тѣлъ.

99. Принявъ объясненный въ § 61 процессъ за способъ опредѣленія температуръ между 0° и 100° стодусной шкалы, мы приступаемъ къ опредѣленію величины расширенія различныхъ тѣлъ, нагрѣваемыхъ до разныхъ температуръ *въ этихъ предѣлахъ*. Мы найдемъ, что однимъ изъ важнѣйшихъ результатовъ изслѣдованія будетъ (приблизительное) измѣреніе температуры помощью этого расширенія, такъ что намъ можно будетъ обойтись безъ того теоретически очень простаго, но практически очень затруднительнаго способа, который сперва былъ нами принятъ для опредѣленія температуры.

Порядокъ простоты *результатовъ* долженъ бы заставить насъ начать съ газовъ, какъ воздухъ и его составныя части; но такъ какъ мы можемъ обращаться съ газами лишь заключивъ ихъ въ сосуды изъ твердыхъ тѣлъ, то простота *процессовъ* требуетъ, чтобы мы начали твердыми тѣлами.

Важность этого изслѣдованія съ обыденной точки зрѣнія состоитъ главнымъ образомъ въ обыкновенномъ

примѣненіи результатовъ къ такимъ случаямъ, какъ уравниваніе хода карманныхъ и стѣнныхъ часовъ и поправка на расширеніе масштабовъ при измѣненіи ихъ температуры. Въ чисто научномъ отношеніи интересъ его гораздо выше.

100. Твердое тѣло, котораго свойства во всѣхъ точкахъ одни и тѣ же, называется *однороднымъ*; въ противномъ случаѣ оно *неоднородно*. Но даже и однородное тѣло можетъ не имѣть одинаковыхъ свойствъ во всѣхъ направленіяхъ. Строеніе дерева, волокнистаго желѣза, кристаллическая форма и плоскости спайности минераловъ, плоскости отложенія и раскалыванія сланцевъ и песчаниковъ и многія другія сходныя явленія знакомятъ насъ съ понятіемъ о твердыхъ тѣлахъ, которыя однородны, но не *изотропны*. Изотропное тѣло таково, что если вырѣзать изъ него маленькую шарообразную часть, то никакимъ разсмотрѣніемъ этой части нельзя будетъ рѣшить, какъ она первоначально помѣщалась въ тѣлѣ: свойства ея во всѣхъ направленіяхъ совершенно одинаковы. Вѣроятно, нѣтъ ни одного тѣла, которое было бы изотропно по отношенію ко всемъ своимъ физическимъ свойствамъ; но такія вещества, какъ металлы некристаллическаго сложенія (свинецъ, золото, серебро, мѣдь) и хорошо прокаленное стекло можно считать приблизительно изотропными, какъ и однородными. Мы начинаемъ со стержня или бруска изъ подобнаго матеріала и дѣлаемъ слѣдующее опредѣленіе:

Коэффициентъ линейнаго расширенія при какой-нибудь температурѣ есть отношеніе приращенія длины бруска, когда температура его повышается на одинъ градусъ, къ его начальной длинѣ.

101. Такъ какъ брусокъ предполагается однороднымъ

и нагрѣваемымъ по всей длинѣ до одинаковой температуры, то каждый дюймъ его длины возрастаетъ на одну и ту же величину, такъ что все приращеніе прямо пропорціонально начальной длинѣ. Чтобы получить результатъ независимый отъ размѣровъ взятаго образца, мы, слѣдовательно, должны взять *отношеніе* приращенія ко всей начальной длинѣ: это и содержится въ опредѣленіи, сдѣланномъ выше. Можно было бы для опредѣленія линейнаго расширенія, какъ свойства даннаго вещества, взять брусокъ не произвольной, а единичной длины, и опредѣлить линейное расширеніе, какъ удлиненіе взятой единицы длины на одинъ градусъ температуры. Но на дѣлѣ никто не работаетъ съ точною единицей и потому мы должны сдѣлать наше опредѣленіе независящимъ отъ длины взятаго въ работу образца; оно не должно, конечно, зависѣть и отъ единицы длины.

102. Такъ какъ эта книга не имѣетъ цѣлью обучить подробностямъ опытныхъ *методовъ*, которые всегда легче и болѣе соотвѣтственнымъ образомъ изучаются въ лабораторіи, чѣмъ въ аудиторіи или помощью книгъ, то достаточно сказать, что коеффиціентъ расширенія бруска обыкновенно находятъ измѣреніемъ его длины—или разстоянія между двумя сдѣланными на немъ мѣтками—сперва окруживъ его тающимъ льдомъ, а затѣмъ еще разъ послѣ того, какъ онъ оставался нѣкоторое время погруженнымъ въ водяную ванну или ванну изъ другой подходящей жидкости при опредѣленной температурѣ. Температуру ванны послѣ этого измѣняютъ и производятъ новое измѣреніе. Измѣренія могутъ быть прямо сдѣланы помощью микроскопа и винта; или можно сравнить длины нагрѣваемаго бруска съ длиною другого, помѣщеннаго въ ваннѣ съ тающимъ льдомъ параллельно

первому. Методы, при которых одинъ конецъ бруска укрѣпляется неподвижно, а другой при расширеніи перемѣщаетъ ломаный рычагъ или зеркало, не столь надежны, какъ тѣ, при которыхъ непосредственно измѣряется разстояніе между двумя опредѣленными точками бруска. Способы эти имѣютъ своимъ главнымъ и во многихъ случаяхъ весьма важнымъ примѣненіемъ — лекціонные

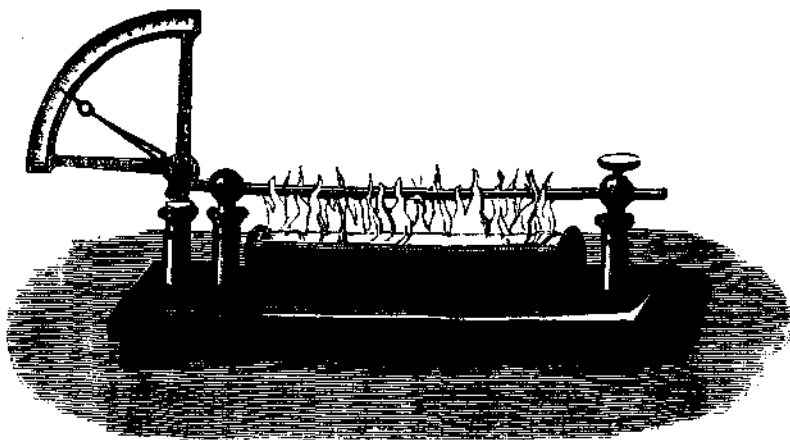


Рис. 7

опыты. Начало, на которомъ они основаны, очень просто.

Одинъ конецъ бруска или стержня укрѣпленъ въ стойкѣ *A*; другой конецъ, проходящій свободно чрезъ отверстіе въ другой стойкѣ *B*, упирается въ спинку плоскаго зеркала, которое поддерживается горизонтальной осью *C*, перпендикулярной къ стержню. (Читатель легко можетъ самъ дополнить описаніе чертежомъ). Каждое передвиженіе впередъ свободного конца стержня

будетъ, конечно, обусловливаться расширеніемъ, и величина его легко можетъ быть опредѣлена по измѣненію направленія свѣтового луча, отражаемаго зеркаломъ, такъ какъ измѣненіе этого направленія равно двойному углу поворота зеркала; а тангенсъ угла вращенія зеркала равняется отношенію увеличенія длины стержня къ высотѣ надъ нимъ оси *C*. Такимъ образомъ чрезъ пониженіе *C* можно почти безгранично увеличивать чувствительность аппарата. Прилагаемый рисунокъ изображаетъ старую форму этого приспособленія, гдѣ мѣсто зеркала занимаетъ ломаный рычагъ.

Чрезвычайно чувствительный методъ введенъ въ недавнее время Физо. Онъ основанъ на образованіи такъ-называемыхъ Ньютоновыхъ колецъ, явленія, которое происходитъ отъ заимыванія свѣтового луча при двукратномъ его прохожденіи чрезъ слой воздуха между чечевицею и плоской стеклянной пластинкой. Цвѣтъ колецъ измѣняется съ разстояніемъ пластинки отъ чечевицы, такъ что если первую укрѣпить неподвижно, а вторую придвигать къ концу распрямляющагося стержня, то по измѣненію цвѣта можно будетъ измѣрить расширеніе стержня съ большою точностью.

103. Общій результатъ подобныхъ измѣреній оказался чрезвычайно простымъ, а именно:

Отношеніе приращенія длины къ длине при нуль пропорціонально возмущенію температуры.

Пусть l_0 изображаетъ длину опредѣленной части стержня при t^0 *C*; тогда приведенный выше опытный результатъ прямо выразится формулою

$$\frac{l_t - l_0}{l_0} = kt \dots\dots\dots (a)$$

гдѣ k коэффициентъ пропорціональности. Отсюда, поло-

живъ $t = 1$, мы видимъ на основаніи опредѣленія (§ 100), что k есть коэффициентъ расширенія при 1° .

Значеніе k обыкновенно такъ мало, что для сколько-нибудь точнаго опредѣленія его мы должны измѣнять температуру въ довольно широкихъ границахъ. Вызвъ для нихъ крайнія температуры нашей временной шкалы, т. е. измѣряя длину стержня сперва въ тающемъ лѣдѣ, а затѣмъ въ кипящей водѣ, мы имѣемъ

$$\frac{l_{100} - l_0}{l_0} = 100 k.$$

Коэффициентъ линейнаго расширенія есть, следовательно, сотая часть отношенія приращенія длины бруска между температурами 0°C и 100°C къ длине его при 0°C .

101. Рѣдко случается, чтобы два образца даже изъ одного и того же матеріала обладали какимъ-нибудь опредѣленнымъ свойствомъ совершенно въ одинаковой степени. Это замѣчаніе относится даже къ естественнымъ кристалламъ и, следовательно, еще болѣе къ искусственнымъ составамъ, какъ стекло и т. п., такъ что невозможно привести какихъ-либо вполне опредѣленныхъ общихъ данныхъ о коэффициентахъ расширенія. Нижеслѣдующія числа должно поэтому рассматривать исключительно какъ примѣръ того рода результатовъ, которые достигнуты—какъ числа, совершенно достаточныя для обоснованія некоторыхъ общихъ замѣчаній по этому предмету, но совершенно непригодныя для какого-нибудь примѣненія въ точныхъ расчетахъ и при изготовленіи точныхъ приборовъ. Когда оптикъ (достойный этого названія) беретъ стекла изъ флинта - и кроунгласса для того, чтобы сдѣлать ахроматическую лещенку, онъ не

ищетъ показателей преломленія ихъ въ таблицахъ результатовъ прежнихъ наблюдателей: ему приходится очень тщательно самому измѣрить эту постоянную для матеріала каждаго изъ стеколъ и притомъ болѣе, чѣмъ для одной опредѣленной длины свѣтовой волны. Производитель электрическихъ аппаратовъ дѣйствительно высокаго достоинства—малѣйшаго гальванометра или длиннѣйшаго подводнаго кабеля—долженъ тщательно выбирать мѣдъ путемъ опредѣленія ея удѣльнаго сопротивленія. Подобныя же соображенія примѣнимы или должны бы быть примѣнимы въ каждой практической отрасли физической науки.

ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЛИНЕЙНАГО РАСШИРЕНІЯ
ИЗОТРОПНЫХЪ ВЕЩЕСТВЪ.

Стекло	$0,0000085 = \frac{1}{120,000}$
Платина	$0,0000085 = \frac{1}{120,000}$
Сталь	$0,0000121 = \frac{1}{85,000}$
Мѣдъ	$0,0000191 = \frac{1}{52,000}$
Цинкъ	$0,000029 = \frac{1}{34,000}$

105. Въ предыдущей таблицѣ, хотя и завѣдомо скудной, обращаютъ на себя вниманіе два результата. *Во-первыхъ*, коэффициентъ линейнаго расширенія вообще очень малъ; *во-вторыхъ*, его величина весьма значительно различается для разныхъ твердыхъ тѣлъ.

Изъ перваго слѣдуетъ, что—исключая очень тонкіе опыты, и очень высокія температуры—измѣненіемъ раз-

мѣровъ твердыхъ тѣлъ съ температурою можно пренебрегать, кромѣ случаевъ, когда мы имѣемъ дѣло съ очень большими длинами, какъ желѣзныя стропила моста или желѣзнодорожные рельсы.

Изъ второго результата, въ соединеніи съ опытнымъ закономъ § 103, выходитъ, что посредствомъ сочетанія двухъ различныхъ матеріаловъ можно производить *компенсацию* (уравниваніе), если устроить такъ, чтобы разстояніе между двумя опредѣленными точками сложной системы увеличивалось бы вслѣдствіе расширенія нѣкоторыхъ ея частей и уменьшалось въ той же степени вслѣдствіе расширенія другихъ.

Возьмемъ самый простой примѣръ. Пусть мы имѣемъ два сходныхъ бруска изъ цинка и мѣди, которые расположены параллельно и соединены у одного конца поперечною частью. Условіе, при которомъ разстояніе между двумя стойками, укрѣпленными на свободныхъ концахъ этихъ брусковъ, будетъ оставаться постояннымъ при всѣхъ обыкновенныхъ температурахъ, состоитъ лишь въ томъ, чтобы полная величина расширенія каждого изъ брусковъ была одинакова. Такъ какъ коэффициенты расширенія цинка и мѣди стоятъ другъ къ другу въ отношеніи 29 : 19, то требуемое условіе тотчасъ будетъ

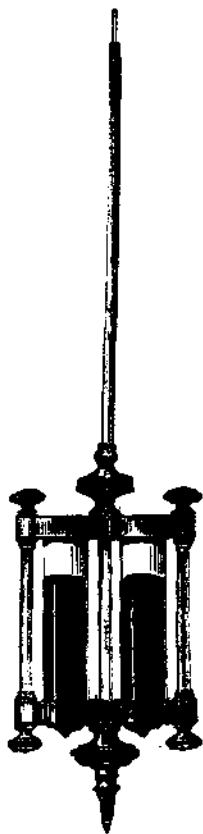


Рис. 8.

выполнено, если взять *длины* брусковъ въ отношеніи 19 : 29. Такъ, пользуясь различною расширяемостью разныхъ веществъ, мы можемъ устроить масштабъ, котораго длина не зависѣла бы отъ температуры. Подобное приспособленіе въ сущности имѣется въ ртутномъ *уравнительномъ маятникѣ* Грэма (рис. 8). Нѣсколько болѣе сложное приспособленіе этого рода образуетъ маятникъ Гаррисона.

Читатель, который овладѣлъ простыми примѣрами, данными выше, не встрѣтитъ какихъ-либо затрудненій и въ болѣе сложныхъ случаяхъ.

106. Въ карманныхъ часахъ или карманномъ хронометрѣ круговой маятникъ съ его пружиной («волоскомъ»)



Рис. 9.

выполняетъ то же назначеніе, какъ въ стѣнныхъ—маятникъ совмѣстно съ тяжестью. Но здѣсь способъ уравниванія значительно сложнее, потому что коэффициентъ упругости пружинки кругового маятника зависитъ отъ температуры, тогда какъ тяжесть, дѣйствующая на маятникъ стѣнныхъ часовъ, постоянна. Мы однакоже рассмотримъ здѣсь только вопросъ о компенсаціи возрастающаго момента инерціи кругового маятника вслѣдствіе его расширенія. [Дѣйствіе теплоты на пружинку кругового маятника обыкновенно дѣлаетъ необходимою добавочную поправку, но начало остается то же самое].

Мы знаемъ, что когда стержень или, лучше, плоская полоса изъ дерева или металла изгибается, то слои съ ея выпуклой стороны подвергаются растяженію, а слои вогнутой — сжатію сравнительно съ промежуточными. Отсюда очевидно, что такая полоса *изгибалась-бы сама собою*, если слои съ одной изъ продольныхъ сторонъ ея расширялись или сжимались-бы по отношенію къ слоямъ другой стороны. Такимъ образомъ полоска, спаянная или склепанная изъ полосокъ двухъ металловъ различной

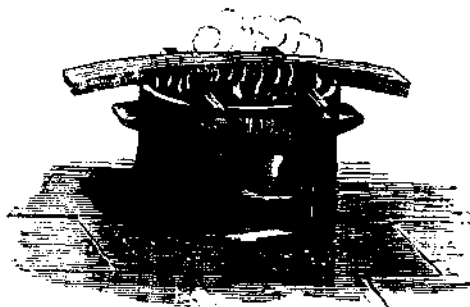


Рис. 10.

расширяемости, будетъ изгибаться при измѣненіи температуры, причемъ наиболѣе расширяющійся металлъ окажется съ выпуклой стороны при нагрѣваніи всей полоски и съ вогнутой при охлажденіи (см. рис. 10).

Положимъ теперь, что ободокъ кругового маятника (рис. 9) сдѣланъ изъ двухъ концентрическихъ слоевъ, притомъ наружный изъ болѣе расширяющагося металла. Пусть, кромѣ того, ободокъ будетъ разрѣзанъ на отдѣльныя дуги настолько удаленныя, чтобы онѣ не могли прикасаться. Тогда легко видѣть, что расширение радіальныхъ брусковъ будетъ стремиться увеличить мо-

ментъ инерціи цѣлаго, между тѣмъ какъ возрастающая кривизна дугъ будетъ уменьшать его.—Тесьма изъ двухъ различно расширяющихся металловъ, подобная только что описанной, была примѣнена Брекетомъ къ устройству чрезвычайно чувствительнаго термометра (рис. 11). Тесьма обыкновенно свертывалась спиралью, которая укрѣплялась за верхній конецъ вертикально къ подставкѣ; къ нижнему же концу тесьмы прикрѣплялся легкій указатель,двигающійся по горизонтальному раздѣ-

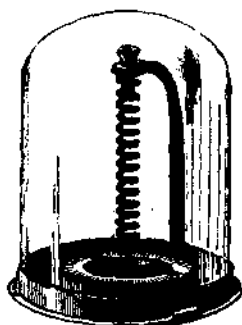


Рис. 11.

ленному кругу. Тесьма настолько тонка, что почти моментально принимаетъ температуру окружающей среды; температура же самой среды вслѣдствіе этого не измѣняется сколько-нибудь замѣтнымъ образомъ, потому что тепловая емкость тесьмы очень мала.

107. Изъ таблички § 104 вытекаетъ одно очень важное въ практикѣ обстоятельство. Коэффициентъ расширения платины и стекла почти одинаковъ, и дальнѣйшіе опыты показываютъ, что то же самое приблизительно вѣрно въ очень широкихъ предѣлахъ температуры. Вслѣд-

ствіе этого платиновая проволока можетъ быть *вплавле-
на* въ стеклянный сосудъ: стекло, расплавленное помощью
паяльной лампы, пристаётъ къ горячей проволокаѣ, а такъ
какъ при постепенномъ охлажденіи оба матеріала сокра-
щаются одинаково, то мѣсто соединенія стекла съ пла-
тиной будетъ совершенно непроницаемо для воздуха.
Если попробовать сдѣлать то же съ проволокой изъ зо-
лота или какого нибудь-другого трудноплавкаго ме-
талла, то попытка почти навѣрное не удастся, какъ-бы
тонка ни была проволока: или стекло треснетъ при охла-
жденіи, или проволока сожмется сильнѣе стекла, и мѣсто
соединенія будетъ проницаемо для воздуха.

108. Два обстоятельства — то, что платина можетъ
считаться неплавкою въ обыкновенныхъ плавильныхъ
печахъ и что коэффициентъ ея линейнаго расширенія
очень мало измѣняется въ широкихъ предѣлахъ темпе-
ратуры, обусловили примѣненіе ея къ грубому измѣре-
нію высокихъ температуръ. Этого рода грубые приборы
обыкновенно называются *пирометрами*. Начало, на ко-
торомъ основано ихъ дѣйствіе, состоитъ въ томъ, что
отмѣчаютъ длину платиноваго бруска въ то время, какъ
онъ находится въ печи, и тщательно сравниваютъ эту
длину съ длиною бруска въ холодномъ состояніи.

Брусокъ вкладывается въ дыру, высверленную въ
кускаѣ графита, коэффициентъ расширенія котораго чрез-
вычайно малъ. Брусокъ упирается въ дно дыры и удер-
живается въ своемъ положеніи туго скользящей пробкой
изъ графита или обожженной глины. Расширяясь отъ
теплоты, платиновый брусокъ толкаетъ пробку впередъ,
но при охлажденіи не тянетъ ее обратно. Начало то же
самое, которое извѣстно каждому изъ обыкновеннаго
максимальнаго термометра.

109. Когда тѣло *неизотропно* (aeolotropic), его свойства неодинаковы по всѣмъ направленіямъ. И хотя условія тогда менѣе просты, чѣмъ въ случаѣ изотропныхъ тѣлъ, но они обыкновенно не бываютъ очень сложными. Ибо вообще, даже въ самыхъ сложныхъ случаяхъ, эти свойства могутъ быть отнесены къ тремъ опредѣленнымъ направленіямъ подъ прямыми углами другъ къ другу. Когда эти направленія опредѣлены и когда сдѣланы измѣренія какого-либо даннаго свойства (напр. коэффициента линейнаго расширенія, о которомъ теперь идетъ рѣчь) параллельно этимъ направленіямъ, тогда численное значеніе этого свойства въ какомъ-нибудь другомъ опредѣленномъ направленіи можетъ быть найдено посредствомъ простого математическаго дѣйствія.

[Потребовалось бы нѣсколько больше математическихъ разсужденій, чѣмъ сколько ихъ можетъ быть введено въ элементарную книгу, если бы мы захотѣли показать, что, между тѣмъ какъ свойства изотропнаго тѣла аналогичны свойствамъ шара, свойства неизотропнаго тѣла стоятъ въ такомъ же отношеніи къ эллипсоиду. Это положеніе, равно какъ и все нижеслѣдующее, примемъ за доказанное. Эллипсоидъ можно разсматривать происшедшимъ изъ шара такимъ образомъ, что весь шаръ растянуть или сжать въ различной степени по тремъ направленіямъ, параллельнымъ тремъ выбраннымъ въ шарѣ діаметрамъ подъ прямыми углами другъ къ другу. Эллипсоидъ опредѣленъ, если извѣстны направленіе и длина трехъ главныхъ его осей (три взаимно перпендикулярныя линіи, о которыхъ упомянуто выше). Когда длина двухъ какихъ-либо осей эллипсоида одинакова, онъ становится эллипсоидомъ вращенія (продолговатымъ, если третья ось самая длинная, и сплю-

ценнымъ, если она самая короткая); когда же всѣ три оси равны, эллипсоидъ дѣлается шаромъ. Итакъ, если величина сжатія или растяженія параллельно *двумъ* изъ трехъ діаметровъ одинакова, то шаръ дѣлается эллипсоидомъ вращенія; когда же эта величина одинакова во всѣхъ трехъ направленіяхъ, то онъ остается шаромъ. Каждое плоское сѣченіе эллипсоида есть эллипсъ. Каждый эллипсъ, у котораго два равныхъ сопряженныхъ діаметра другъ другу перпендикулярны, есть кругъ. Эллипсоидъ, который имѣетъ два такихъ круговыхъ плоскихъ сѣченія, что линія, соединяющая ихъ центры, перпендикулярна къ ихъ плоскостямъ, есть эллипсоидъ вращенія, и только что названная линія—его ось. Всѣ линіи, проведенныя чрезъ центр эллипсоида вращенія въ одинаковомъ наклоненіи къ оси, равны между собой. Если эллипсоидъ произошелъ изъ шара путемъ одного растяженія и двухъ равныхъ сжатій или одного сжатія и двухъ равныхъ растяженій, то въ немъ есть рядъ діаметровъ (всѣ они одинаково наклонены къ оси), которые не измѣнились въ длинѣ].

110. Самыя однородныя изъ извѣстныхъ намъ тѣлъ—естественныя кристаллы. Они не вполне изотропны, ибо имѣютъ плоскости болѣе или менѣе совершенной спайности. Но большая группа кристалловъ, именно кристаллы *первой*, или правильной системы (за немногими любопытными исключеніями, вѣроятно, лишь *кажущимся*) изотропны по отношенію къ свѣту и также по отношенію къ теплотѣ. Къ этой системѣ относятся вещества столь различныя, какъ алмазъ, свинцовый блескъ, каменная соль и т. д.; коэффициентъ ихъ линейнаго расширенія по всѣмъ направленіямъ одинъ и тотъ же.

Кристаллы квадратной и гексагональной системъ и

вообще всё тѣла, имѣющія *одну* оптическую ось, какъ и одну ось симметріи, обладаютъ наибольшимъ или наименьшимъ коэффициентомъ расширенія въ направленіи этой оси и одинаковымъ коэффициентомъ во всѣхъ направленіяхъ ей перпендикулярныхъ.

Всѣ прочія кристаллизованныя тѣла обладаютъ тремя главными коэффициентами расширенія, которые всѣ различны и направлены подъ прямыми углами другъ къ другу.

111. Оптическіе инструменты, напр. отражательный гониометръ, позволяютъ съ весьма большою точностью измѣрять углы между гранями кристалловъ, и угловые измѣренія вообще гораздо точнѣе и пригоднѣе для рѣшенія такихъ вопросовъ, каковъ нашъ, чѣмъ прямая измѣренія длины. Дѣйствительно, Митчерлихъ и другіе пришли почти исключительно путемъ угловыхъ измѣреній къ тѣмъ результатамъ, о которыхъ вкратцѣ сказано въ § 110.

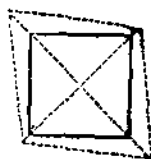


Рис. 12.

Какъ простой примѣръ, предположимъ, что изъ *неизотропнаго* тѣла вырѣзана квадратная призма такъ, что діагонали одного изъ ея оснований параллельны двумъ главнымъ осямъ кристалла и, слѣдовательно, имѣютъ различные коэффициенты линейнаго расширенія. Нагрѣваніе необходимо измѣнитъ квадратъ въ ромбъ—какъ на рис. 12—и отношеніе длины діагоналей весьма точно находится измѣреніемъ одного изъ угловъ.

Недостатокъ этого способа состоитъ въ томъ, что онъ даетъ лишь *разность* линейныхъ расширеній въ направленіи обѣихъ діагоналей, но не дѣйствительную величину ихъ. Ибо, если діагонали имѣли единицу длины

при 0°C , то ихъ длины при $t^\circ \text{C}$ будутъ $1 + k_1 t$ и $1 + k_2 t$, а тангенсъ половины измѣреннаго угла ромба—

$$\frac{1 + k_2 t}{1 + k_1 t}, \text{ что приводится къ } 1 + (k_2 - k_1) t,$$

потому что k_1 и k_2 оба чрезвычайно малы.

Положимъ, что двѣ такихъ призмы склеены вмѣстѣ тѣми гранями, которыхъ углы при нагреваніи становятся болѣе тупыми (см. рис. 13). Пока все не нагрѣто,

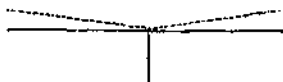


Рис. 13.

верхняя поверхность образуетъ сплошное плоское зеркало; послѣ же нагреванія она будетъ состоять изъ двухъ зеркалъ, наклоненныхъ другъ къ другу. Почти безконечно малая разница расширенія въ различныхъ направленіяхъ можетъ быть открыта, если наблюдать въ зрительную трубу изображеніе, которое получается отъ удаленнаго предмета отраженіемъ отъ граней обѣихъ призмъ.

Такъ-называемые двойниковые кристаллы образованы изъ двухъ частей, соединенныхъ вмѣстѣ до нѣкоторой степени подобно тому, какъ только что описано; явленіе отлично наблюдается, если подогрѣть полированную плитку изъ селенита ¹⁾).

112. Оптическимъ способомъ весьма точно опредѣляются разности между главными коэффициентами расширенія. Остается лишь непосредственно измѣрить одинъ

¹⁾ Разповидность природнаго гипса.

Замѣч. р. перев.

изъ нихъ описанными выше способами (§ 102). Здѣсь съ выгодною прилагается уже упоминавшійся методъ Физо.

Когда это сдѣлано, тогда оказывается, что въ нѣкоторыхъ тѣлахъ, особенно въ исландскомъ шпатѣ, разность обоихъ коэффициентовъ расширенія больше, чѣмъ величина каждаго изъ нихъ. Другими словами, это вещество, обладающее *одною* осью симметріи, при нагрѣваніи расширяется параллельно оси и въ то же время *сокращается* одинаково по всѣмъ направленіямъ перпендикулярнымъ оси.

Изъ объясненій § 109 слѣдуетъ, что въ исландскомъ шпатѣ есть неограниченное число направленій, одинаково наклоненныхъ къ оси, въ которыхъ шпатъ не расширяется и не сжимается. Табъ какъ подобное же свойство присуще нѣкоторымъ сортамъ мрамора, то Брюстеромъ давно была подана мысль употреблять мраморные цилиндры, вырѣзанные въ надлежащемъ направленіи, для маятниковъ неизмѣняющейся длины.

Аномалія сжатія отъ нагрѣванія встрѣчается и не въ однихъ кристаллизованныхъ тѣлахъ. Въ слѣдующей главѣ мы рассмотримъ неправильность, представляемую водою; но очень поучительный примѣръ доставляетъ каучукъ.

Если изъ обыкновенной вулканизированной каучуковой трубки для проведенія газа вынуть спиральную проволоку и подвѣсить трубку вертикально, *привязавъ грузъ къ нижнему ея концу*, то она сокращается (въ нѣкоторыхъ образцахъ на пять и даже на десять процентовъ длины) и приподнимаетъ грузъ, когда внутрь ея направляютъ струю пара изъ маленькаго кипятильника. Такимъ образомъ мы имѣемъ сокращеніе, легко видимое въ большой

аудитория безъ тѣхъ искусственныхъ приспособленій (§ 102), при помощи которыхъ показывается расширение тѣла.

113. Опытный результатъ § 103 содержитъ, какъ дальнѣйшее слѣдствіе, слѣдующее положеніе:

Коэффициентъ кубическаго расширенія во всехъ случаяхъ есть сумма трехъ главныхъ коэффициентовъ линейнаго расширенія.

Это легко видѣть, предположивъ тѣло раздѣленнымъ на нѣкоторое число частей кирпичеобразной формы, которыхъ ребра параллельны тремъ главнымъ осямъ. Длина реберъ каждой такой части при нагреваніи отъ 0° до $t^\circ\text{C}$ измѣняется въ отношеніяхъ

$$1:(1+k_1t), 1:(1+k_2t), 1:(1+k_3t),$$

такъ что объемъ послѣ расширенія въ доляхъ начальнаго объема будетъ

$$V_t = V_0 (1+k_1t) (1+k_2t) (1+k_3t),$$

что въ сущности, такъ какъ величины k всегда чрезвычайно малы, сводится къ

$$\frac{V_t - V}{V_0} = (k_1 + k_2 + k_3)t.$$

Это та же формула, что (а) въ § 103; ея доказывається вышеприведенное положеніе.

Для изотропнаго тѣла значенія k одинаковы, и коэффициентъ кубическаго расширенія равняется тройному коэффициенту линейнаго. Такимъ образомъ для этого рода тѣлъ достаточно одного лишь опредѣленія (выбравъ то, которое производится легче для точнѣе другихъ).

Объемъ неизотропнаго тѣла при нагреваніи можетъ увеличиться, уменьшиться или остаться безъ измѣненія.

Слѣдовательно, какъ бываетъ измѣненіе объема безъ измѣненія формы, такъ точно мы можемъ имѣть измѣненіе формы безъ измѣненія объема.

114. Большая часть способовъ непосредственно измѣренія объемнаго измѣненія основана на примѣненіи расширяющихся жидкостей.

При изложеніи принципа, на которомъ основаны эти способы, мы сперва предположимъ нерасширяющійся сосудъ и нерасширяющуюся жидкость, а затѣмъ покажемъ способъ поправки на расширение сосуда, — отлагая до слѣдующей главы описаніе того, какъ измѣняется расширение жидкостей и какъ оно принимается въ расчетъ.

Пусть сосудъ, содержащій твердое тѣло, кубическое расширение котораго требуется опредѣлить, будетъ наполненъ до конца своего (узкаго) горлышка нерасширяющеюся жидкостью, и пусть будетъ опредѣленъ вѣсъ сосуда съ его содержимымъ. Положимъ, что затѣмъ сосудъ нагрѣтъ до нѣкоторой опредѣленной температуры: тогда вслѣдствіе расширения (если таковое будетъ) твердаго тѣла часть жидкости выльется. По охлажденіи взвѣсимъ еще разъ. Разность въ вѣсѣ равна вѣсу жидкости, вытѣсненной расширеніемъ твердаго тѣла.

Поправка на расширение сосуда, который обыкновенно дѣлается изъ стекла или другого изотропнаго вещества, по § 113 будетъ

$$V_t - V_0 = 3kV_0t,$$

гдѣ k — коэффициентъ линейнаго расширения.

115. Большая часть предыдущаго вѣрно лишь приблизительно, даже въ тѣхъ узкихъ предѣлахъ температуры (отъ 0° до 100° C), которыми вообще мы ограничивали наши положенія.

Измѣренія, произведенныя при гораздо высшихъ температурахъ, показали, что какъ коэффициентъ линейнаго, такъ и кубическаго расширенія не постоянны, а возрастаютъ медленно съ повышеніемъ температуры. Намъ неизвѣстно опытовъ, произведенныхъ съ цѣлью удостовѣриться, что коэффициенты эти, какъ то вѣроятно, постепенно уменьшаются съ пониженіемъ температуры ниже 0° .

Въ предыдущемъ подразумѣвалось, что теплота не производила остающихся молекулярныхъ измѣненій въ изслѣдуемомъ тѣлѣ. Пока это такъ, до тѣхъ поръ размеры тѣла при одной и той же температурѣ на дѣлѣ всегда одни и тѣ же, подвергалось-ли тѣло нагрѣванію или охлажденію. Но всякій знаетъ, что быстрее охлажденіе часто имѣетъ явное вліяніе на свойства тѣла. Такъ - называемое «отжиганіе» назначается главнымъ образомъ для предотвращенія подобныхъ физическихъ измѣненій. Этотъ предметъ, за исключеніемъ нѣсколькихъ правилъ, найденныхъ путемъ испытаній, въ общемъ еще очень теменъ. Подумаемъ, напримѣръ, о чрезвычайномъ различіи условій внутренняго напряженія и т. д., въ которыхъ постепенно затвердѣваютъ разныя части Рупертовой капли ¹⁾. Большое усовершенствованіе въ практикѣ приготовленія стали, сдѣланное въ недавнее время, основывается существеннымъ образомъ на томъ, что даютъ стали затвердѣвать подъ значительнымъ давленіемъ.

116. *Содержаніе* §§ 99—115. — Линейное расширеніе твердаго бруска приблизительно пропорціонально повышенію температуры. Отсюда кубическое расширеніе

¹⁾ „Батавскія слезки“. *Зам. р. перев.*

изотропныхъ тѣлъ (равное тройному линейному) также пропорціонально повышенію температуры. Особья исключенія, представляемыя неизотропными тѣлами. Применение расширенія при изготовленіи масштабовъ, уравнительныхъ маятниковъ и круговыхъ маятниковъ, пирометровъ, брегетовскихъ металлическихъ термометровъ. Неправильности, производимыя быстрымъ охлажденіемъ и т. д.

ГЛАВА VI.

Расширеніе жидкостей и газовъ.

117. Вопросъ о расширеніи жидкостей и газовъ гораздо проще, чѣмъ твердыхъ тѣлъ, такъ какъ мы имѣемъ здѣсь одно лишь кубическое расширеніе. Взявъ сперва жидкости, мы находимъ, что вообще ихъ кубическое расширеніе, какъ и твердыхъ тѣлъ, прямо пропорціо-нально повышенію температуры, но больше, чѣмъ расширение твердыхъ тѣлъ.

Особенно много труда и экспериментальнаго искусства было посвящено этому вопросу по отношенію къ двумъ обыкновеннымъ жидкостямъ: *ртути*, вслѣдствіе ея важнаго значенія при устройствѣ термометровъ, и *воды*, потому что ея расширеніе въ обыкновенныхъ предѣлахъ температуры ненормально, и эта ненормальность тѣсно связана съ законами водяныхъ теченій. Мы намѣрены посвятить по нѣскольку параграфовъ каждой изъ этихъ жидкостей, такъ какъ ихъ можно считать типическими.

Замѣтимъ, что то, чего мы ищемъ, есть истинное расширеніе, а не такъ-называемое *кажущееся*, зависящее отъ расширенія сосуда.

118. Положимъ, какъ въ § 114, что стеклянный со-

судъ съ очень узкимъ горлышкомъ наполненъ до верху ртутью при 0°C и взвѣшенъ; пусть онъ затѣмъ нагрѣтъ до $t^{\circ}\text{C}$ и снова взвѣшенъ по охлажденіи. Положимъ, что вѣса соотвѣтственно были W_0 и W_t и что w — вѣсъ пустого сосуда.

Такъ какъ сосудъ при 0° заключаетъ количество ртути, вѣсящее

$$W_0 - w,$$

то при температурѣ t° онъ содержалъ бы количество ртути, вѣсящее

$$(1 + 3kt) (W_0 - w),$$

въ предположеніи, что ртуть нерасширяема. На дѣлѣ сосудъ заключаетъ при t° количество ртути, вѣсящее лишь $W_t - w$. Отношеніе этихъ двухъ чиселъ, слѣдовательно, равно отношенію плотностей ртути при 0° и при t° , и если K будетъ средній коэффициентъ кубическаго расширенія ртути между 0° и t° , то мы получимъ

$$(1 + Kt) (W_t - w) = (1 + 3kt) (W_0 - w),$$

откуда K тотчасъ можетъ быть вычисленъ.

Для повѣрки этого уравненія предположимъ расширеніе жидкости равнымъ расширенію сосуда, т. е.

$$K = 3k;$$

тогда мы имѣемъ

$$W_t = W_0,$$

изъ чего видно, что жидкость какъ разъ наполняла бы сосудъ при всякихъ температурахъ.

119. Этотъ приѣмъ простъ и цѣлесообразенъ, хотя онъ содержитъ опредѣленіе расширенія какъ сосуда, такъ и (видимаго расширенія) жидкости, потому что

расширеніе ртути гораздо больше, нежели стекла. Но весьма остроумный способ опредѣленія расширенія жидкости независимо отъ расширенія сосуда, въ которомъ она заключена, придуманъ Дюлономъ и Пти и примѣненъ очень искусно Реньо. Способъ основывается на простомъ гидростатическомъ условіи равновѣсія двухъ жидкостей, содержащихся въ колѣнахъ U -образной трубки, а именно, что высоты столбовъ жидкости надъ общею имъ поверхностью (поверхностью соприкосновенія жидкостей) обратно пропорціональны плотностямъ.

На практикѣ, во избѣжаніе прямого соприкосновенія теплої жидкости съ холодною, ихъ раздѣляютъ пространствомъ, содержащимъ воздухъ, такъ что приспособленіе въ существенныхъ частяхъ будетъ то, которое представлено на рис. 14. Трубка имѣетъ форму двой-

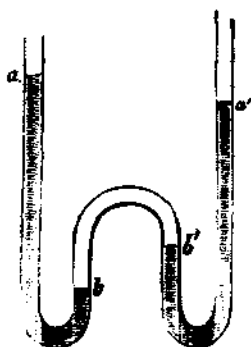


Рис. 14.

ного U ; половина ея окружается сосудомъ съ тающимъ льдомъ, другая—сосудомъ, жидкое содержимое котораго можетъ быть нагреваемо до желаемой температуры.

Оба столба ab , $a'b'$ ртути подвержены сверху да-

$$K_t = 0,0001791 + 0,00000002t^1).$$

Въ настоящемъ случаѣ, какъ и вслѣдъ за этимъ при водѣ, мы оставляемъ на время правило, высказанное въ § 104, и входимъ въ подробности, потому что теперь мы имѣемъ дѣло съ *совершенно определеннымъ* веществомъ, свойства котораго (при однихъ и тѣхъ же условіяхъ, § 9) одинаковы во всякое время и во всякомъ мѣстѣ, а не съ такими веществами, какъ стекло, латунь и т. п., различные образцы которыхъ могутъ значительно отличаться другъ отъ друга.

121. Отношеніе воды къ нагреванію въ промежуткѣ отъ 0° до 100°C очень отлично отъ отношенія ртути. Отъ 0° вверхъ вода сжимается, все медленнѣе и медленнѣе, пока не достигнетъ своей *наибольшей плотности* почти точно при 4°C. Отъ 4° вверхъ она расширяется, сперва очень медленно, потомъ быстрѣе и быстрѣе вплоть до 100°.

Обычный классный опытъ, сюда относящійся, извѣстенъ подъ именемъ опыта Гопа. Онъ основанъ на простомъ гидростатическомъ законѣ: когда неоднородная жидкость находится въ устойчивомъ равновѣсіи подѣ дѣйствіемъ тяжести, плотность жидкости возрастаетъ снизу вверхъ.

¹⁾ Здѣсь какое то странное недоразумѣніе. «Обыкновенно употребляемые» коэффициенты расширения суть числа второго столбца таблицы, т. е. *средніе коэффициенты расширения* въ промежуткѣ отъ 0° до t° ; помощью ихъ вычисляется объемъ тѣла (въ настоящемъ случаѣ ртути) при данной температурѣ, когда извѣстенъ его объемъ при 0°. Числа третьего столбца представляютъ *истинные коэффициенты расширения ртути* при различныхъ температурахъ по даннымъ Реньо. (см. *Rélation des Expériences, ... Mém. de l'Ac. des Sciences*, t. XXI, p. 328). Что же касается послѣдняго столбца (числа котораго авторъ выдаетъ за истинные коэффициенты расширения ртути), то значеніе его остается совершенно невыясненнымъ. Зам. р. перев.

Горъ окружаетъ такъ - называемою охладительною смѣсью (для этого можетъ служить смѣсь обыкновенной соли со снѣгомъ или толченнымъ льдомъ) средину цилиндрической банки, наполненной водою (рис. 15). Два тер-

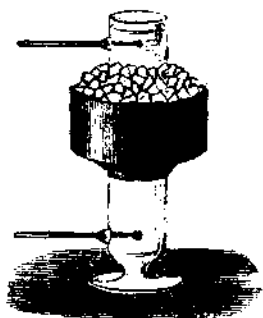


Рис. 15.

мометра вставлены при помощи пробокъ въ отверстія боковой стѣнки: они указываютъ температуру верхняго и нижняго слоевъ воды.

Пока охладительная смѣсь не положена (предполагается, что температура воды выше 4°C) верхній термометръ обыкновенно показываетъ нѣсколько высшую температуру, свидѣтельствуя этимъ, что теплая вода менѣе плотна, чѣмъ холодная. Отъ дѣйствія охлаждающей смѣси прежде всего понижается температура, показываемая нижнимъ термометромъ, между тѣмъ какъ температура верхняго не измѣняется замѣтнымъ образомъ. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока ртуть нижняго термометра не упадетъ до 4° : тогда она останавливается; а вскорѣ послѣ того въ свою очередь начинаетъ падать температура, показываемая верхнимъ термометромъ. Но она не останавливается на 4°C . Она опускается все ниже и ниже, пока наконецъ вода вверху не начнетъ

замерзать, т. е. не охладится до 0° . Этимъ доказывается, что вода при 4°C плотнѣе, чѣмъ при всякой другой температурѣ между 0° и 100° , потому что она постоянно остается на днѣ сосуда, какова бы ни была температура воды поверхъ ея.

Такой опытъ однако не пригоденъ для измѣренія коэффициентовъ расширенія. Для этой цѣли нѣкоторые наблюдатели взвѣшивали кусокъ стекла въ водѣ различной температуры, другіе поступали по способу, указанному въ § 119. Слѣдующая таблица взята изъ работы Коппа (*Poggendorff's Annalen*, 1847). Такъ какъ объемъ воды при 4°C принять за единицу, то избытокъ каждаго изъ остальныхъ чиселъ надъ единицею выражаетъ полное расширеніе отъ 4° до соотвѣтствующей температуры.

РАСШИРЕНІЕ ВОДЫ ПРИ ОВЫКНОВЕННОМЪ ДАВЛЕНІИ.

Темп. С.	Объемъ воды.	Темп. С.	Объемъ воды.
0°	1,00012	20°	1,00169
2	1,00003	30	1,00420
3	1,00001	40	1,00766
4	1,00000	50	1,01189
5	1,00001	60	1,01672
6	1,00003	70	1,02237
8	1,00011	80	1,02871
10	1,00025	90	1,03553
15	1,00082	100	1,04312

Числа этой таблицы отъ 0° до 20° съ большою степенью приближенія представляются формулой

$$V_t = 1 + \frac{(t-4)^2}{144000}.$$

Отсюда коэффициентъ расширения воды (въ этихъ границахъ) приблизительно есть

$$K_t = \frac{t-4}{72000} {}^1).$$

Изъ опытныхъ результатовъ, данныхъ Матиссеномъ Пьерромъ и Гагеномъ, въ среднемъ можно заключить, что знаменателемъ этой дроби было бы ближе взять 68000.

По Дебре, объемъ воды, при охлажденіи ея болѣе, чѣмъ на четыре градуса ниже температуры наибольшей плотности, увеличивается нѣсколько сильнѣе, чѣмъ когда вода нагрѣвается на то же число градусовъ выше 4°. Вода можетъ быть охлаждена на нѣсколько градусовъ ниже 0° С, не замерзая, если она не находится въ движеніи.

Грасси нашелъ, что сжимаемость воды возрастаетъ все быстрѣе и быстрѣе по мѣрѣ пониженія температуры до 4° С и даже ниже. Изъ этого слѣдуетъ, какъ показано будетъ позже, что *точка наибольшей плотности воды понижается дѣйствіемъ давленія*. Опытныя данныя не содержатъ еще вполне опредѣленныхъ указаній, но можно (приблизительно) сказать, что давленіе въ 50 атмосферъ понижаетъ точку наибольшей плотности воды на 1° С.

122. Наиболѣе расширяющіяся изъ всѣхъ извѣстныхъ жидкостей суть тѣ, которыя требуютъ значитель-

¹⁾ Эта формула получается изъ первой (для V_t), если взять отношеніе безконечно малаго приращенія объема къ безконечно малому приращенію температуры и перейти къ предѣлу — другими словами, если взять производную $\left(\frac{dV}{dt}\right)$ объема по температурѣ. Зам. р. перев.

наго давленія для удержанія ихъ въ жидкомъ состоянїи. Коэффициенты расширенія сѣрнистаго ангидрида или угольнаго ангидрида, заключенныхъ въ герметически запаянныя трубки, значительно больше коэффициента расширенія воздуха.

Вотъ нѣкоторые данныя Тилорье по отношенію къ плотности жидкаго угольнаго ангидрида въ присутствїи его паровъ при различныхъ температурахъ:

Температура.	Плотность.
— 20° С	0,90
0	0,83
+ 30	0,60

Такимъ образомъ среднее расширеніе на 1° между 0° С и 30° С приблизительно равно 0,013.

Какъ общее приблизительное правило можно сказать, что (при обыкновенныхъ температурахъ) жидкость имѣетъ тѣмъ большій коэффициентъ расширенія, чѣмъ она летучѣе. Однако спиртъ (коэффициентъ расширенія котораго 0,00105 при 0° С) расширяется значительно болѣе эфира.

123. Переходя къ расширенію газовъ, мы встрѣчаемся съ задачею совершенно отличной отъ той, съ которой мы имѣли дѣло выше. Ибо нельзя сказать, чтобы данное количество газа имѣло какой-либо опредѣленный объемъ, если не будутъ указаны или величина заключающаго газъ сосуда или давленіе, которому газъ подверженъ. Дѣйствіе умѣренныхъ давленій на объемъ твердыхъ и большинства жидкихъ тѣлъ такъ мало, что мы не нашли нужнымъ принимать его въ расчетъ. говоря о расширеніи такихъ веществъ. Твердое или жидкое тѣло, заключенное даже въ оболочку значительнаго

сопротивленія. будетъ расширяться почти такъ же, какъ если бы оно было свободно; и если оболочка не поддается растяженію, то оно просто разорветъ ее. Что же касается газовъ, то мы не въ состояніи указать высшаго предѣла объема, который можетъ занимать данное количество газа при обыкновенныхъ температурахъ. Съ другой стороны, если подвергнуть нагрѣванію крѣпкій сосудъ, содержащій газъ при атмосферномъ давленіи, то сосудъ расплавился или, по крайней мѣрѣ, размягчился бы прежде, чѣмъ давленіе заключеннаго въ немъ газа было бы въ состояніи его разорвать.

Отсюда слѣдуетъ, что мы должны измѣрять или расширение (т. е. отношеніе приращенія объема къ начальному объему) газа при постоянномъ давленіи, или отношеніе приращенія давленія къ начальному давленію въ газѣ, удерживаемомъ при постоянномъ объемѣ, — то и другое для даннаго повышения температуры.

Первые грубые опыты, сдѣланные Шарлемъ около 1787 года, и послѣдующія болѣе совершенныя измѣренія Гэ-Люссака показали, что величины, которыхъ опредѣленіе сейчасъ дано, не только *одинаковы для даннаго газа, но имѣютъ одно и то же численное значеніе для всѣхъ газовъ*, по крайней мѣрѣ, въ предѣлахъ отъ 0° до 100° C.

Хотя эти результаты вѣрны лишь приблизительно, но они достаточно точны для многихъ весьма важныхъ приложений, какъ теоретическихъ, такъ и практическихъ: мы поэтому посвятимъ одинъ или два параграфа изученію слѣдствій, къ которымъ они приводятъ, прежде чѣмъ дать болѣе точные результаты современныхъ изслѣдованій.

124. Въ 1662 году Робертъ Бойль опубликовалъ опытный фактъ, составляющій нынѣ такъ-называемый **законъ Бойля:**

Объемъ данной массы газа при данной температурѣ обратно пропорціоналенъ давленію ¹⁾.

Къ атому мы можемъ присоединить (въ нѣсколько обобщенной формѣ) результатъ, сообщенный въ предыдущемъ §, — такъ-называемый

законъ Шарля:

Объемъ данной массы газа, находящагося подъ постояннымъ давленіемъ, возрастаетъ на определенную часть своей величины при данномъ повышеніи температуры ²⁾.

Оба закона могутъ быть соединены въ простой формулѣ:

$$pv = C (1 + \alpha t),$$

гдѣ C есть постоянная для каждаго газа величина (зависящая отъ его количества и качества), а α — коэффициентъ кубическаго расширенія газа.

Первое дѣйствительно хорошее опредѣленіе α было сдѣлано Рудбергомъ. Для нашей настоящей цѣли мы можемъ взять

$$\alpha = 0,003665$$

125. По поводу положеній послѣдняго § здѣсь должно сдѣлать три замѣчанія.

¹⁾ Тотъ же законъ опубликованъ нѣсколько позже, въ 1679, въ Парижѣ Мариоттомъ, и все еще называется на нашемъ материкѣ — хотя и невѣрно — закономъ Мариотта.

²⁾ Этотъ законъ опубликованъ Гэ-Люссакомъ (1802), который самъ однако приписываетъ его Шарлю (1787). Законъ нынѣ называютъ также закономъ Гэ-Люссака.

Первое.—Обратимъ вниманіе на замѣчательный фактъ, что коэффициентъ расширенія (практически) одинаковъ для всѣхъ газовъ. Фактъ этотъ указываетъ на большую простоту свойствъ газовъ по отношенію къ тепловымъ явленіямъ и наводитъ на мысль, что газовый термометръ, вѣроятно, долженъ быть предпочтенъ ртутному.

Второе.—Замѣтимъ, что обѣ формы (§§ 123, 124), въ которыхъ мы выразили результатъ Шарля, на дѣлѣ выводятся одна изъ другой при помощи закона Бойля. Это ясно изъ написаннаго въ послѣднемъ § уравненія, ибо p и v входятъ въ него одинаковымъ образомъ.

Мы дали законъ Шарля, какъ примѣнимый для всѣхъ температуръ между 0° и 100° C. На дѣлѣ это совершенно вѣрно; но не слѣдуетъ упускать изъ виду, что мы до сихъ поръ еще не дали точнаго опредѣленія градуса температуры.

Третье.—Если мы предположимъ формулу § 124 примѣнимою ко всѣмъ температурамъ, то придемъ къ очень важному выводу, что p и v должны уничтожиться при особой температурѣ, которая одинакова для всѣхъ газовъ, т. е. если какой-нибудь газъ будетъ охлажденъ до температуры

$$t = - \frac{1}{\alpha} = - \frac{1}{0,003665} = - 273^\circ \text{ приблизительно,}$$

—при которой выраженіе $1 + \alpha t$ превращается въ нуль—то онъ или перестанетъ занимать какой-либо объемъ, или не будетъ оказывать давленія на стѣнки содержащаго его сосуда. Такимъ образомъ мы получаемъ первый грубый намекъ на положеніе абсолютнаго нуля температуры, т. е. температуры тѣла, совершенно лишеннаго теплоты.

Нелишнее будетъ напомнить учащемуся, между прочимъ, указаніе (данное выше, § 96), что такой абсолютный нуль дѣйствительно существуетъ, и прибавить, что названное грубое приближеніе довольно удовлетворительнымъ образомъ опредѣляетъ его положеніе на обыкновенной стоградусной шкалѣ. Истинные способы изученія подобныхъ вопросовъ основываются однако на общихъ законахъ термодинамики, примѣнимыхъ ко всѣмъ тѣламъ, а не на свойствахъ какой-нибудь особой группы веществъ, какъ-бы просты ни были ихъ законы.

126. Если мы замѣнимъ абсолютнымъ нулемъ, опредѣленнымъ такимъ образомъ, нашу нулевую точку (§ 61), которая въ полномъ нашемъ распоряженіи, то мы должны будемъ взять $t - \frac{1}{\alpha}$ вмѣсто t ; тогда выраженіе для законовъ Бойля и Шарля приметъ видъ

$$pv = Rt,$$

гдѣ R есть нѣкоторая опредѣленная постоянная для каждаго газа.

Какъ уже сказано (§ 123), эта зависимость лишь приблизительно вѣрна, и отклоненія отъ нея будутъ послѣ тщательно разсмотрѣны; но степень приближенія оказывается наибольшею въ тѣхъ газахъ, которые труднѣе всего сгущаются въ жидкость, а для даннаго газа тѣмъ большею, чѣмъ выше его температура и (съ ограниченіями) чѣмъ болѣе онъ разрѣженъ.

Кинетическая теорія газовъ, которая будетъ изложена въ послѣдствіи, показываетъ намъ, что чѣмъ меньше взаимное дѣйствіе частицъ газа въ то время, когда онѣ не находятся въ соприкосновеніи, сравнительно съ взаимнымъ ихъ дѣйствіемъ во время удара, тѣмъ точнѣе удовле-

творяется данное выше равенство. Поэтому мы называемъ *идеально совершеннымъ газомъ* вещество, между частицами котораго взаимодействие происходитъ единственно въ моментъ удара и для котораго, слѣдовательно (какъ доказывается въ кинетической теоріи газовъ) произведеніе изъ давленія на объемъ строго пропорціонально абсолютной температурѣ.

Опыты Джоуля и Томсона показываютъ, что при подобныхъ условіяхъ абсолютная температура, вытекающая изъ свойствъ идеально совершеннаго газа, вполне тождественна съ абсолютной температурой, опредѣляемой (§ 96) помощью обратимаго круговаго процесса Карно.

Итакъ, воздушный термометръ, надлежащимъ образомъ устроенный, даетъ мѣру температуры болѣе согласную съ термодинамической теоріей, нежели ртутный.

Но необходимо замѣтить еще разъ (какъ въ § 59), что рѣшительно все равно, какой инструментъ употребляется, лишь-бы онъ былъ хорошъ въ своемъ родѣ и лишь бы его показанія могли быть переведены на соответственные абсолютныя температуры согласно опредѣленію § 95.

127. Возвращаясь къ положеніямъ § 123, мы теперь можемъ дать понятіе о методахъ, которыми пользовался Реньо въ своихъ классическихъ изслѣдованіяхъ. Сущность и способъ употребленія его аппаратовъ указывается во всѣхъ главнѣйшихъ чертахъ схематически рис. 16, представляющимъ нѣсколько упрощенную форму аппарата, которая дана Бальфуръ Стьюартомъ.

Двѣ стеклянныхъ трубки равнаго діаметра (для избѣжанія, по возможности, дѣйствій капиллярныхъ силъ) укрѣплены вертикально въ брыжкѣ замкнутаго сосуда,

наполненного ртутью. Емкость этого сосуда может быть по желанію измѣняема ввинчиваніемъ винта, соединеннаго съ пробкой или поршнемъ. Одна изъ тру-

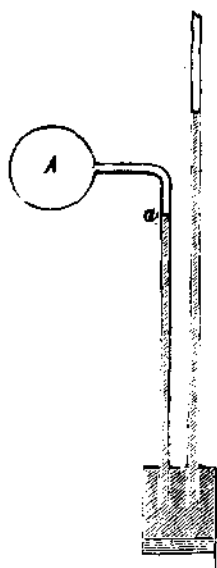


Рис. 16.

бокъ вверху открыта, другая переходитъ въ стеклянный шаръ *A*, содержащій изслѣдуемый газъ. Этотъ шаръ и, насколько то нужно, при-
мыкающая къ нему часть трубки окружаются попеременно тающимъ льдомъ и парами воды, кипящей подъ давленіемъ одной атмосферы (§ 134).

Когда требуется опредѣлять измѣненіе объема при постоянномъ давленіи, вгоняютъ или выдвигаютъ поршень на столько, чтобы при каждой изъ выбранныхъ температуръ ртуть стояла въ обѣихъ трубкахъ на одномъ уровнѣ. Давленіе газа въ *A* въ такомъ случаѣ какъ разъ равняется давленію атмосферы во время наблюденія; объемъ газа въ *A* и въ

трубкѣ долженъ быть при каждой температурѣ точно измѣренъ. Слѣдуетъ, конечно, сдѣлать поправку (малую сравнительно съ измѣненіемъ объема газа) на расширеніе шара отъ теплоты.

Для опредѣленія измѣненія давленія при постоянномъ объемѣ устанавливаютъ поршень при каждой температурѣ такъ, чтобы уровень ртути приводился къ определенной мѣткѣ *a*, сдѣланной на той трубкѣ, которая соединена съ шаромъ: тогда разность уровней ртути въ обѣихъ трубкахъ, сложенная съ высотой столба ртути въ барометрѣ, покажетъ давленіе газа. Кромѣ поправки

на расширеніе шара отъ теплоты, слѣдуетъ слѣлать поправку (находимую опытомъ) на расширеніе его вслѣдствіе возрастающаго давленія.

Реньо употреблялъ и другіе способы. Напримѣръ, стеклянный сосудъ съ узкимъ горломъ наполнялся ртутью и взвѣшивался. Такимъ образомъ узнавалась емкость сосуда. Послѣ этого сосудъ наполнялся сухимъ воздухомъ, нагрѣвался до 100°C и герметически запаивался вмѣстѣ съ содержащимся въ немъ разрѣженнымъ газомъ; по охлажденіи сосудъ открывали подъ ртутью и опредѣляли вѣсъ вошедшей ртути. Достаточно будетъ сказать, что результаты этихъ опытовъ удовлетворительнымъ образомъ согласовались съ тѣми, которые получены помощью описанныхъ раньше аппаратовъ.

128. Слѣдующая таблица содержитъ нѣкоторые результаты Реньо. Первый столбецъ даетъ отношеніе объема газа при 100°C къ его объему при 0° подъ атмосфернымъ давленіемъ; второй—давленіе при 100°C , когда газъ взятъ подъ давленіемъ 1 атмосферы при 0° и нагрѣвается безъ измѣненія объема.

Водородъ	1,3661	. . .	1,3667
Воздухъ	1,3670	. . .	1,3665
Азотъ	1,3670	. . .	1,3668
Окись углерода	1,3669	. . .	1,3667
Угольный ангидридъ . . .	1,3710	. . .	1,3688
Сѣрный ангидридъ . . .	1,3903	. . .	1,3845

Обратимъ вниманіе на то, что числа перваго столбца для всѣхъ газовъ, за исключеніемъ водорода, больше чиселъ второго; а также, что для менѣе легко сжимаемыхъ газовъ, каковы въ таблицѣ первые четыре, числа обоихъ столбцовъ почти одинаковы, между тѣмъ какъ

ГЛАВА VII.

Термометры.

131. Нынѣ повидимому удостовѣрено, что первымъ изобрѣтателемъ термометра былъ Галилей, до 1597 г. (см. *Mémoire sur la Détermination de l'Echelle du Thermomètre de l'Académie del Cimento*, par G. Libri *Ann. de Chimie*, XLV. 1830). Его термометръ былъ

воздушный, состоявшій изъ шарика съ трубкой, погруженной въ сосудъ съ жидкостью. Первое примѣненіе его было къ опредѣленію температуры человѣческаго тѣла. Пациентъ бралъ шарикъ въ ротъ, и воздухъ, расширяясь, тѣснилъ жидкость книзу: она опускалась по мѣрѣ возвышенія температуры шарика. По высотѣ, на которой жидкость окончательно устанавливалась въ трубкѣ, врачъ судилъ, имѣла ли болѣзнь лихорадочный характеръ, или нѣтъ.

Подобный же инструментъ былъ употребляемъ съ тою же цѣлью врачомъ Сакредо, который до послѣдняго времени и считался изобрѣтателемъ термометра.

Однако показанія воздушныхъ термометровъ зави-



Рис. 17.

сятъ какъ отъ измѣненій температуры заключеннаго въ нихъ воздуха, такъ и отъ перемѣнъ атмосфернаго давленія; слѣдовательно, пока послѣднее обстоятельство не устранено или не принято въ расчетъ, показанія термометра не имѣютъ никакого значенія.

Термометры съ жидкостью, герметически запаянною въ стеклѣ, были впервые приготовлены подъ руководствомъ Риньери (умершаго въ 1647 г.) -- Джузеппе Маріани, къ фамиліи котораго за его искусство въ выдуваніи стекла было прибавлено *Il Gonfia*.

Многіе изъ термометрическихъ отчетовъ Риньери можно найти въ *Мемуарахъ Академіи del Cimento*: но эти отчеты долго считались потерявшими свое значеніе, такъ какъ самые инструменты не могли быть сравнены съ нашею термометрической шкалою.

Однако въ 1829 году нѣсколько подлинныхъ инструментовъ найдено Атинори, и ихъ дѣленія были сравнены съ дѣленіями Реамюровой шкалы, такъ что отчеты Риньери нынѣ могутъ быть понимаемы.

Одно изъ физическихъ изслѣдованій, для которыхъ употребляла эти термометры Флорентинская Академія, состояло въ опредѣленіи, происходитъ-ли плавленіе льда всегда при одной и той же температурѣ, или нѣтъ. Вопросъ этотъ окончательно былъ рѣшенъ въ положительномъ смыслѣ.

Слѣдующій большой шагъ впередъ сдѣланъ былъ въ термометріи Ньютономъ въ его *Scala graduum Caloris*, помѣщенной въ *Philosophical Transactions* 1701 года, гдѣ онъ предлагаетъ принять температуры таянія льда и кипѣнія воды за нормальныя точки термометра.

132. Фарнтейтъ въ Данцигѣ былъ первый, который около 1714 г. сталъ дѣлать термометры съ однокобраз-

для легко сжимаемых онъ очень различаются и тѣмъ болѣе, чѣмъ легче газъ сжимается.

129. Слѣдующія числа, тоже найденныя Реньо, показываютъ отношеніе, въ которомъ давленіе возрастаетъ при постоянномъ объемѣ, въ однихъ и тѣхъ же предѣлахъ температуры, когда начальное давленіе больше или меньше одной атмосферы:

	Давленіе въ атмосферахъ при 0°.	Отношеніе давленій при 100° и при 0°.
Воздухъ	0,1444	1,36482
	1,0000	1,36650
	4,81	1,37091
Углеродный ангидридъ.	0,998	1,36856
	4,722	1,38598

Такимъ образомъ при измѣненіи давленія въ предѣлахъ отъ 1 до 4,8 атмосферъ отношеніе это измѣняется для воздуха приблизительно на $\frac{1}{1000}$, между тѣмъ какъ для углероднаго ангидрида въ предѣлахъ 1 до 4,7 атмосферъ то же отношеніе измѣняется болѣе, чѣмъ на $\frac{1}{100}$.

Для расширенія подъ постояннымъ давленіемъ въ томъ же промежуткѣ температуръ мы имѣемъ:

	Давленіе въ атмосферахъ.	Отношеніе объемовъ при 100 и при 0°.
Воздухъ	1	1,36706
	3,447	1,36964
Водородъ	1	1,36613
	3,349	1,36616
Углеродный ангидридъ	1	1,37099
	3,316	1,38455

Мы вернемся къ этому предмету, когда будемъ разсматривать термодинамическія начала въ приложеніи ихъ къ различнымъ состояніямъ вещества.

130. *Смѣрженіе* §§ 117—119. Расширеніе жидкостей, въ особенности ртути и воды. Удельный весъ ртути. Расширеніе газовъ. Законъ Гюйгенса и Шарля. Новый способъ на абсолютный нуль температуры. Результаты Гейсса по отношенію къ увеличенію объема при постоянномъ давленіи и уменьшеніи давленія при постоянномъ объемѣ — для различныхъ газовъ.

нымъ дѣленіемъ. Эти термометры вошли въ употребленіе въ Англіи, и Фарнгейтово дѣленіе до сихъ поръ наиболѣе обыкновенно въ странахъ съ англійскимъ нарѣчіемъ. Въ шкалѣ Фарнгейта температура таянія льда отмѣчена 32° , а температура кипѣнія воды 212° .

Стоградусная шкала введена Цельсіемъ изъ Упсалы. Въ ней точка замерзанія отмѣчена 0° , а точка кипѣнія 100° . Очевидная простота дѣленія промежутка между исходными точками на 100 частей послужила причиною того, что это дѣленіе, вмѣстѣ съ французскою десятичною системою мѣръ, было принято учеными, въ особенности на материкѣ Европы.

Шкала Реамюра, въ которой точка замерзанія обозначена 0° , а точка кипѣнія 80° , еще употребляется для нѣкоторыхъ медицинскихъ и домашнихъ цѣлей на европейскомъ материкѣ.

Существованіе трехъ различныхъ термометрическихъ шкалъ представляетъ примѣръ того неудобства, которое происходитъ отъ недостатка однообразія въ системахъ измѣренія.

Подраздѣленіе промежутка между точками замерзанія и кипѣнія на 180° было, вѣроятно, подражаніемъ дѣленію полуокружности на 180 градусовъ. Последнее же имѣло началомъ то, что число 360 обладаетъ большимъ числомъ дѣлителей. Выборъ нулевой точки сдѣланъ былъ Фарнгейтомъ, вѣроятно, вслѣдствіе предположенія, что обыкновенная охлаждающая смѣсь изъ льду и соли даетъ низшую достижимую температуру ¹⁾.

¹⁾ Что касается основанія, послужившаго Фарнгейту для выбора нулевой точки, то приведенное выше мнѣніе довольно общепринято. Остальная же часть шкалы можетъ быть обоснована и слѣдующимъ образомъ: Фарнгейтъ принимаетъ за дру-

Если мы предположимъ, что къ одному и тому же термометру присоединены всѣ три шкалы или (еще лучше), что онѣ начерчены рядомъ на самой трубкѣ, то легко увидимъ, какъ дѣлается переходъ отъ одной шкалы къ другой.



Рис. 18.

Если f , c и r будутъ различные отчеты одной и той же температуры (рис. 18), то очевидно, что

$f - 32$	относится къ	$(212 - 32)$ или	180,
какъ c	»	»	100
и какъ r	»	»	80.

Отсюда

$$\frac{f - 32}{180} = \frac{c}{100} = \frac{r}{80}$$

[До сихъ поръ все это законно и необходимо. Но прогрессъ науки (!) во второй половинѣ 19 столѣтія повидимому требуетъ, по крайней мѣрѣ въ Англіи, что-

гую нормальную точку—температуру человеческого тѣла и называетъ ее 100° (F). Тогда то обстоятельство, что между точками таянія и кипѣнія помѣщается 180 градусовъ, было бы лишь случайностью.

Быть можетъ, не безынтереснымъ покажется еще замѣчаніе, что Цельсій (1742) обозначалъ 0 град. точку кипѣнія, а 100 градусами точку замерзанія, и что лишь въ 1750 г. Штрёмеръ перемѣстилъ числа, давъ такимъ образомъ шкалѣ ея нынѣшній видъ.

бы (для экзаменаціонныхъ цѣлей на quasi-китайскій лахъ) были предлагаемы «задачи» всякій разъ, какъ представляется къ тому случай.

Для учащагося, которому предстоитъ подобное испытаніе, приведемъ два примѣра, которые не лучше, не хуже всѣхъ обыкновенныхъ задачъ этого рода; но больше мѣста мы не можемъ удѣлить подобнымъ вещамъ, какъ бы онѣ ни были *полезны*.

Чтобы найти температуру, которая выражается однимъ и тѣмъ же числомъ по шкаламъ Фаренгейта и стоградусной, поставимъ f вмѣсто c или c вмѣсто f и получимъ

$$\frac{f - 32}{180} = \frac{f}{100},$$

слѣдовательно,

$$f = c = -40^{\circ}.$$

Или еще, чтобы найти температуру, которой отчетъ по стоградусному термометру есть сумма отчетовъ по Фаренгейту и Реамюру, положимъ

$$c = f + r$$

и будемъ имѣть

$$c = 32 + \frac{180}{100}c + \frac{80}{100}c,$$

откуда

$$c = -20. \text{ И также } f = -4, r = -16.$$

Безъ преувеличенія, у насъ, въ Англіи, при составительныхъ испытаніяхъ на служебныя должности знаніемъ подобныхъ пустяковъ можно склонить вѣсы въ свою пользу].

133. Стеклянныя трубки для термометровъ съ жидкостью не высверливаются, а вытягиваются, вслѣдствіе чего необходима ихъ *калибровка*: сперва грубая, для того,

чтобы отбросить всѣ трубки, которыхъ просвѣтъ не окажется приблизительно одинаковымъ по всей длинѣ; затѣмъ болѣе тщательная, дабы найти и внести въ таблицу недостатки трубокъ уже выбранныхъ.

Приемъ очень простъ. Въ трубку вводятъ ртутный столбикъ длиною въ одинъ или два дюйма и, легкимъ наклоненіемъ трубки заставляя его передвигаться съ одного мѣста въ другое, измѣряютъ его длину въ каждомъ послѣдовательномъ положеніи. Чѣмъ уже просвѣтъ въ мѣстѣ, занимаемомъ ртутью, тѣмъ длиннѣе будетъ столбикъ. Эти указанія потомъ принимаются въ расчетъ при градуированіи трубки помощью дѣлительной машины.

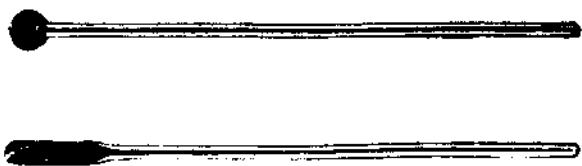


Рис. 19.

Размѣръ «шарика», или резервуара термометра (въ нормальныхъ инструментахъ обыкновенно цилиндрической формы) опредѣляется затѣмъ тремя величинами: 1) поперечнымъ сѣченіемъ трубки; 2) расширяемостью взятой жидкости; 3) требуемой длиною градуса шкалы. Величина резервуара, конечно, стоитъ въ прямомъ отношеніи къ первой и третьей изъ нихъ и въ обратномъ отношеніи ко второй.

Когда шарикъ выдутъ, его слегка подогреваютъ на спиртовой лампѣ, чтобы выгнать немного воздуха, и погружаютъ открытый конецъ трубки въ назначенную для

термометра жидкость. При охлажденіи шарика нѣсколько жидкости вгонится въ трубку дѣйствіемъ атмосфернаго давленія, и когда инструментъ снова будетъ поставленъ прямо, жидкость частью войдетъ въ шарикъ. Тогда подвергаютъ ее въ шарикѣ кипяченію, чтобы выгнать ее парами воздухъ, и снова быстро погружаютъ конецъ трубки въ жидкость. Когда все охладится, шарикъ и трубка будутъ совершенно наполнены жидкостью; избытокъ ее изгоняется новымъ нагреваніемъ шарика. Послѣ этого жидкости даютъ прокипеть еще разъ, чтобы удалить весь воздухъ изъ трубки, и затѣмъ конецъ трубки герметически запаиваютъ. Такимъ образомъ, когда термометръ, приготовленный какъ слѣдуетъ, положенъ горизонтально, жидкость въ немъ находится только подъ давленіемъ своихъ собственныхъ паровъ.

134. Всегда желательно имѣть термометрическую трубку, которая бы вмѣщала обѣ постоянныя точки, 0° и 100° . Если это не можетъ быть сдѣлано или если вмѣсто ртути, берется жидкость, кипящая при низшей температурѣ, чѣмъ вода, то опредѣленные точки шкалы должны быть установлены путемъ тщательнаго сравненія съ нормальнымъ инструментомъ.

Если термометрическій промежутокъ достаточно великъ, то постоянныя точки устанавливаются слѣдующимъ образомъ.

Точка замерзанія. Шарикъ и часть трубки погружаются (рис. 20) въ толченый ледъ, съ котораго вода можетъ свободно стекать, и оставляются на нѣкоторое время, пока верхній конецъ ртути, только что видимый изъ льда, не приметъ неизмѣннаго положенія. Это положеніе тщательно отмѣчается на стеклянной трубкѣ нулевой чертой или, если на трубку уже предварительно

нанесены дѣленія произвольной шкалы (причемъ принята въ расчетъ калибровка, § 133), нулевая точка тщательно наблюдается, и положеніе ея записывается.

Точка кипѣнія. Послѣ этого инструментъ погружается, какъ можно осторожнѣе, въ пары, свободно отдѣляющіеся съ поверхности воды, которая кипитъ подъ давленіемъ 1 атмосферы. Найдено, что температура кипящей воды не-

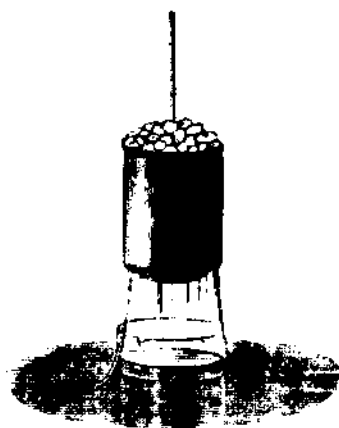


Рис. 20.

постоянна, тогда какъ температура отдѣляющагося пара постоянна. Приложенный рисунокъ (21) изображаетъ обычное приспособленіе и не требуетъ объясненій: но мы должны дать точное опредѣленіе того, что понимается подъ давленіемъ въ 1 атмосферу. (См. выноску § 61).

Давленіе ртутнаго столба на данной глубинѣ подъ его поверхностью въ хорошо наполненномъ барометрѣ (трубка котораго достаточно широка для предотвращенія сколько-нибудь замѣтнаго капиллярнаго дѣйствія) зави-

СИТЬ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ОТЪ ДВУХЪ ОБСТОЯТЕЛЬСТВЪ: ОТЪ ПЛОТНОСТИ РТУТИ И ОТЪ НАПРЯЖЕНІЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ.

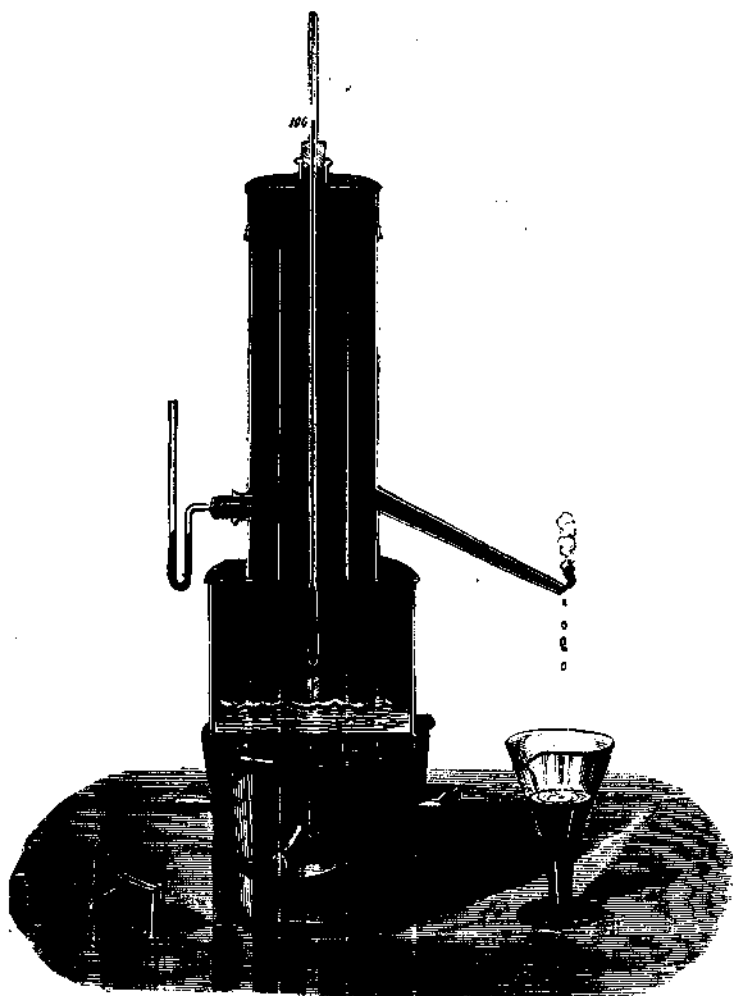


Рис. 21.

Для небольшого столба ртути можно пренебречь сжатіемъ, проходящимъ отъ его собственнаго вѣса, такъ что плотность (если ртуть чиста) на дѣлѣ зависитъ лишь отъ температуры. Поэтому, опредѣляя барометрическое давленіе, мы должны приводить столбъ ртути къ его длинѣ при 0°C . (См. § 120).

Напряженіе силы тяжести зависитъ отъ географической широты и отъ высоты надъ среднимъ уровнемъ моря. Слѣдовательно, и то, и другое должно быть принято въ расчетъ при опредѣленіи «давленія атмосферы».

По принятому въ Англіи опредѣленію это есть давленіе атмосфернаго воздуха, когда барометръ, приведенный къ 0°C , показываетъ 29,905 дюйма на уровнѣ моря подъ широтою Лондона ¹⁾.

Измѣненіе давленія, отвѣчающее измѣненію температуры кипѣнія воды на одинъ градусъ, по близости 100°C , составляетъ около 1,071 дюйма ²⁾. Оно нѣсколько меньше для температуръ ниже 100° и нѣсколько больше для температуръ выше этой. Но одного только что названнаго числа достаточно для практическаго опредѣленія точки кипѣнія вблизи морского уровня. Дальнѣйшее разсмотрѣніе этого вопроса должно быть отложено до тѣхъ поръ, когда мы будемъ изучать *измѣненія молекулярнаго состоянія*, производимыя теплотою. (См. ниже, § 165).

135. Ртутный термометръ можетъ быть употребляемъ въ предѣлахъ отъ температуры немного высшей точки плавленія ртути (-40°C) до температуры нѣсколькими

¹⁾ 29,905 дюйма = 759,6 миллиметра, или приблизительно 76 сантиметра.

²⁾ 1,071 дюйма = 27,2 миллиметра.

градусами ниже точки ея кипѣнія (350°C). Для опредѣленія температуръ около или ниже -40°C обыкновенно употребляемая жидкость есть винный спиртъ, такъ какъ онъ замерзаетъ около -130°C . Для температуръ гораздо высшихъ 300°C должно прибѣгать къ воздушному термометру или, въ случаѣ грубыхъ опредѣленій, къ пирометрамъ (§ 108) или термоэлектрическимъ явленіямъ. Когда очень чувствительный термометръ требуется для обыкновенныхъ температуръ, тогда, очевидно, подходящею жидкостью будетъ угольный ангидридъ (§ 122).

Такъ-называемыхъ *maximim*- и *minimim*-термометровъ, т. е. инструментовъ, отмѣчающихъ высшую или низшую температуру въ теченіе даннаго времени, придумано въ практикѣ безчисленное множество. Простей-

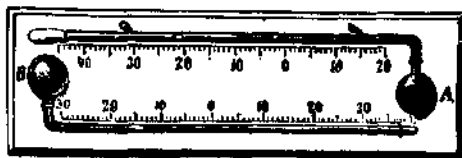


Рис. 22.

шій и наиболѣе обыкновенный основанъ на дѣйствіи капиллярныхъ силъ. Въ максимальномъ термометрѣ *A* обыкновенно употребляется столбъ ртути, толкающій впереди себя маленькій указатель изъ желѣза (которое не смачивается ртутью), въ минимальномъ — столбъ спирта, который увлекаетъ за собою маленькій эмалевый указатель (вполнѣ смачиваемый спиртомъ). Дѣйствующая здѣсь сила во всѣхъ случаяхъ обусловлена стремленіемъ поверхности жидкости принять наименьшую величину, какая возможна при наличныхъ условіяхъ. Примѣняются и другія начала. Напримѣръ, есть максималь-

ный термометръ. въ которомъ ртуть должна проходить чрезъ очень узкое мѣсто трубки вблизи шарика. Расширяясь, ртуть проходитъ свободно: во лишь только она начинаетъ сжиматься, столбикъ ея разрывается въ узкомъ мѣстѣ и остается въ трубкѣ, указывая такимъ образомъ высшую достигавшуюся температуру.

136. Но всѣ эти приспособленія крайне несовершенны, по крайней мѣрѣ, сравнительно съ приѣмомъ *непрерывнаго* записыванія (регистраціи) помощью инструментовъ. Записываніе, конечно, должно быть автоматическимъ. Много остроумныхъ приѣмовъ придумано съ этою цѣлю — всѣ они безусловно превзойдены введеніемъ фотографированія. Фотографическій приѣмъ такъ простъ, изнѣнъ, и въ то же время столь поучителенъ, что мы посвятимъ одинъ или два параграфа его объясненію съ нѣкоторыми изъ его простѣйшихъ слѣдствій.

Этотъ приѣмъ, конечно, приложимъ не только къ температурѣ, но и ко всякой измѣняющейся величинѣ, которая можетъ быть указываема посредствомъ инструмента, каковы напр. барометръ, электрометръ или приборъ, служащій для наблюденій надъ измѣненіями положенія магнитной стрѣлки.

Положимъ, трубка ртутнаго термометра помѣщена вплотную противъ узкой щели, такъ что свѣтъ можетъ проникать только тамъ, гдѣ щель не покрыта столбомъ ртути. Если прямо напротивъ термометра установить газовое пламя, а позади щели равномерно подвигать впередъ полосу фотографической бумаги, то линія, разграничивающая почернѣвшую часть бумаги отъ неизмѣненной, представитъ намъ непрерывную записъ послѣдовательныхъ положеній ртути. Часовой механизмъ, передвигающій бумагу, легко можно устроить

такъ, чтобы онъ отмѣчалъ на бумагѣ каждый часъ или каждую минуту; дѣленія же термометра или нѣкоторыя опредѣленные мѣтки на его трубкѣ легко могутъ быть воспроизведены фотографически.

Когда такая бумажная полоса вынута, изображеніе на ней проявлено и закрѣплено, тогда оно представляетъ по внѣшности нѣчто подобное рис. 23.

Чтобы теперь найти, какая температура была въ извѣстный моментъ, напр. въ 4 часа 41 мин., намъ остается только провести (какъ показано на рисункѣ)

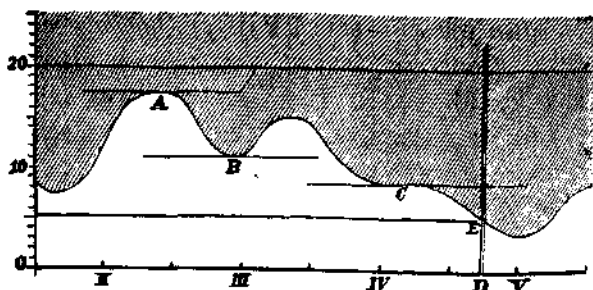


Рис. 23.

линію DE , которая должна была въ это время совпадать со щелью. Точка E , въ которой эта линія встрѣтитъ границу почернѣвшей части бумаги, покажетъ, гдѣ находился конецъ ртутнаго столбика въ данный моментъ времени. На чертежѣ мы имѣемъ температуру $5^{\circ}, 2$.

137. Взглянувъ на чертежъ, мы тотчасъ видимъ, что проведенный отрѣзокъ кривой имѣетъ два максимума и три минимума; признакъ каждой изъ точекъ этого рода тотъ, что касательная къ кривой въ этой точкѣ горизонтальна и не встрѣчается съ кривою. Въ

точкѣ максимума, какъ въ *A*, касательная горизонтальна и (въблизи *A*) сполна лежитъ въ почернѣвшей части *надъ* кривою. Въблизи минимума, какъ въ *B*, она находится сполна въ бѣлой части *подъ* кривою.

Но такая точка, какъ *C* на чертежѣ, очевидно, не есть ни максимумъ, ни минимумъ, хотя касательная здѣсь горизонтальна. Последняя лежитъ надъ кривою по одну сторону отъ *C* и подъ кривою по другую.

Другой способъ разсмотрѣнія, вытекающій очевиднымъ образомъ изъ свойствъ самаго термометра, основывается на томъ положеніи, что *между двумя равными значеніями какой-нибудь измѣняющейся величины всегда непременно имѣется максимумъ или минимумъ*. Слѣдовательно, чѣмъ ближе будутъ другъ къ другу (по времени) обѣ эти равныя величины, тѣмъ точнѣ каждая изъ нихъ будетъ совпадать (во времени и по величинѣ) съ искомымъ максимумомъ или минимумомъ.

[Это простое соображеніе позволяетъ намъ рѣшать многія задачи, для которыхъ обыкновенно предполагается необходимымъ дифференціальное и даже варіаціонное исчисленіе. Такъ, оно достаточно не только для вывода закона преломленія на основаніи предположенія, что свѣтъ требуетъ наименьшаго возможнаго времени для перехода отъ одной точки къ другой, но и для изслѣдованія брахистохронъ, т. е. линій быстрѣйшаго паденія тѣлъ].

138. Общее начало устройства воздушныхъ термометровъ легко понимается изъ даннаго въ § 127 рисунка, изображающаго аппаратъ Бальфуръ Стьюарта. Если берется металлическій резервуаръ, какъ то слѣдуетъ дѣлать, когда имѣется въ виду измѣрять очень высокія температуры, то газъ долженъ быть удерживаемъ

при атмосферномъ давленіи, ибо иначе можно опасаться диффузіи чрезъ металлъ. Даже въ случаѣ стекляннаго резервуара желательное постоянное давленіе—но не по причинѣ проницаемости стекла, а вслѣдствіе измѣненія объема шарика при повышенномъ давленіи изнутри.

До сихъ поръ нѣтъ еще такой формы воздушнаго

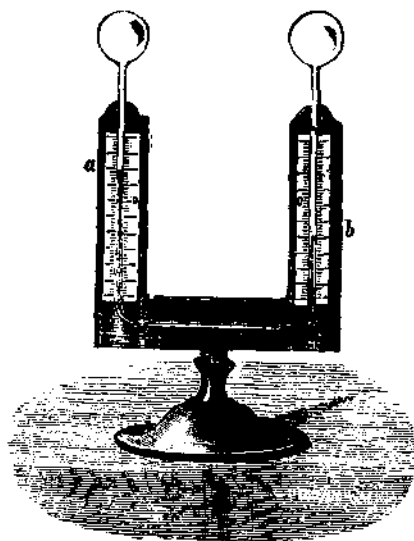


Рис. 24.

термометра, которая была бы въ общемъ употребленіи; всѣ выдающіеся экспериментаторы придумывали особыя формы для тѣхъ специальныхъ задачъ, надъ которыми работали.

Дифференціальный термометръ Лесли и Румфорда есть собственно сочетаніе двухъ воздушныхъ термометровъ, дѣйствующихъ одинъ противъ другого. Въ простѣйшей формѣ (рис. 24) онъ состоитъ изъ стеклянной

трубки съ шариками на обоихъ концахъ. Воздухъ, содержащійся въ шарикахъ, раздѣленъ столбомъ сѣрной кислоты, передвиженія котораго указываютъ разницы давленій, а слѣдовательно и температуръ въ обоихъ шарикахъ. Этотъ приборъ, очевидно, не подверженъ вліянію атмосфернаго давленія; онъ можетъ быть сдѣланъ весьма чувствительнымъ и поэтому часто употребляется. Если сдѣлать съ этимъ инструментомъ всѣ свои опыты надъ лучистой теплотою; а измѣняя матеріалъ шариковъ (обоихъ или одного), онъ превращалъ его въ гигрометръ, въ фотометръ и пр.

139. *Средняя температура въ теченіе даннаго періода времени можетъ быть очень точно получена изъ описаннаго выше фотографическаго рисунка.* Другой способъ состоитъ въ примѣненіи часовъ съ маятникомъ безъ компенсаціи (§ 105): по тому, насколько часы будутъ идти впередъ или отставать сравнительно со среднимъ временемъ, которое показывается нормальными часами, вычисляютъ среднюю длину маятника и отсюда среднюю температуру.

Упомянемъ еще о способѣ, на который натолкнуло наблюдение, впервые сдѣланное Мозлеемъ надъ тѣмъ, какимъ образомъ свинцовый листъ самъ собою отрывался отъ покатой крыши вслѣдствіе перемѣнъ температуры. Способъ состоитъ въ примѣненіи такъ-называемаго «ползуна» Стефенсона (*Stevenson's Creeper*). Это — просто плоская полоса изъ достаточно расширяющагося металла (рис. 25), имѣющая вдоль верхняго и нижняго краевъ равноотстоящіе ряды зубцевъ; она помещена на наклонной плитѣ изъ менѣе расширяющагося матеріала, въ которой нафрезаны горизонтальныя желобки такъ, чтобы можно было вѣдуть къ другу.

Зубья и желобки сдѣланы такъ, что они представляютъ очень малое сопротивленіе движенію вверхъ, но препятствуютъ всякому скольженію внизъ. При повышеніи температуры инструментъ расширяется, и такъ какъ нижній его конецъ не можетъ двигаться внизъ, то долженъ подыматься верхній, котораго зубья такимъ образомъ попадаютъ въ выше лежащій желобокъ. Съ другой стороны, когда вслѣдствіе охлажденія инструментъ укорачивается, нижніе зубцы переходятъ въ желобокъ, лежащій выше, потому что верхній конецъ не

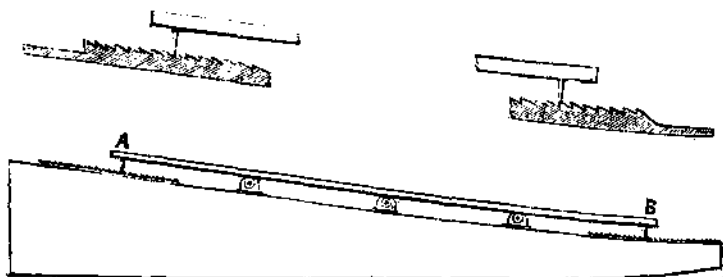


Рис. 25.

можетъ скользить книзу. Изъ этого ясно, что показаніе, даваемое «ползуномъ», зависитъ главнѣйше отъ числа и предѣловъ *колебаній* температуры. — Какимъ образомъ онъ приобретаетъ потенциальную энергію, которою обладаетъ въ своемъ возвышенномъ положеніи, — этотъ вопросъ будетъ разобранъ позже.

140. *Содержаніе §§ 131—139.* Изобрѣтеніе термометра. Ньютоновы постоянныя точки. Шкалы Фаренгейта, Цельсія и Реамюра. Калибровка, градуированіе и наполненіе термометровъ съ жидкостью. Установка постоянныхъ точекъ. Воздушный термометръ. Опредѣленіе

«давленія атмосферы». Предѣлы примѣнимости разныхъ термометровъ. Максимальный и минимальный термометры. Фотографически записывающій термометръ. Свойства максимума, минимума и максимумъ-минимума. Дифференціальный термометръ. Термометры для среднихъ температуръ. Ползунъ.

ГЛАВА VIII.

Измѣненіе молекулярнаго состоянія. Плавленіе и отвердѣваніе.

141. Выше, въ §§ 45—48, мы уже дали общій очеркъ той части нашего предмета, которой посвящена эта глава. Учащемуся предлагается перечитать тѣ параграфы прежде, чѣмъ идти дальше. Ниже мы не разъ будемъ дѣлать подобныя же ссылки.

142. *Плавленіе.* Найдено, что давленіе и температура—единственныя условія, которыя требуется принимать въ расчетъ при разборѣ процесса плавленія. Отсюда, согласно съ принципомъ § 9 и основнымъ принципомъ § 1, мы имѣемъ слѣдующій опытный законъ:

При неизмѣнномъ давленіи всякое твердое тѣло имѣетъ определенную точку плавленія; и (предполагая, что масса перемѣшивается) сколько бы теплоты ни придавалось мало по малу, температура цѣлаго остается при точкѣ плавленія, пока не расплавится послѣдняя частичка.

Это положеніе есть одно изъ основаній ученія Блэка о скрытой теплотѣ. Наше современное знаніе того,

что теплота не есть вещество, заставляет насъ принять, что теплота, которая ускользаетъ отъ термометра, употребляется на разъединеніе частицъ твердаго тѣла. Это не покажется очень удивительнымъ, если мы подумаемъ о работѣ потребной для превращенія сплошной массы въ тонкій порошокъ, каждая частичка котораго все же остается еще твердымъ тѣломъ.—Но первое условіе приведеннаго выше положенія ведетъ къ важному вопросу о вліяніи давленія на точку плавленія. Открытіе этого вліянія сдѣлано Джемсомъ Томсономъ въ 1849 г., и вычисленное имъ пониженіе точки плавленія льда дѣйствіемъ давленія было въ точности подтверждено опытами В. Томсона въ томъ же году. Гонкинсъ, Бунзенъ и другіе опредѣлили опытнымъ путемъ повышеніе точки плавленія, производимое давленіемъ въ веществахъ, которыя *расширяются* при переходѣ въ жидкое состояніе.

143. Какъ примѣръ, указывающій на сущность опытныхъ основъ положенія предыдущаго §, можетъ служить процессъ опредѣленія нулевой точки термометра, описанный выше (§ 134). Тамъ ничего не сказано по поводу *быстроты* таянія льда, т. е. о количествѣ теплоты, которое сообщается ему въ теченіе даннаго времени. (См. также § 131).

Вода и ртуть могутъ быть получены весьма чистыми, но нельзя сказать того же о большинствѣ другихъ веществъ. Поэтому мы даемъ здѣсь (какъ въ § 104) лишь краткую таблицу, содержащую приблизительныя

Точки плавленія.

Ледъ.	0° C
Ртуть	—40

Сѣра	111
Свинецъ	335
Кованое желѣзо	1500 (?)

Нѣкоторые металлическіе сплавы, особенно содержащіе висмутъ, плавятся при температурахъ значительно низшихъ 100° С (эти сплавы получили общее названіе «легкоплавкихъ металловъ»). Недавно открытый металлъ *галлій* плавится около 30° С. Съ другой стороны, платину нельзя расплавить въ обыкновенной плавильной печи; а газовый коксъ (видъ угля) удалось лишь размягчить, но не расплавить, въ самомъ сильномъ жару, какой только до сихъ поръ былъ достигнутъ,—въ жару электрической искры.

144. Какъ уже сказано, дѣйствіе давленія на точку плавленія тѣла было сперва выведено теоретически и затѣмъ подтверждено опытомъ. Причина, почему оно прежде ускользало отъ вниманія наблюдателей, заключается, вѣроятно, въ чрезвычайно малой величинѣ его, даже при большихъ давленіяхъ. Здѣсь не мѣсто вдаваться въ теорію: она будетъ рассмотрѣна позже; но мы можемъ привести теоретическій выводъ въ слѣдующей формѣ:

Точка плавленія тѣлъ, которыя при плавленіи сжимаются, понижается дѣйствіемъ давленія — и наоборотъ.

145. Теоретически выведено для льда и въ точности подтверждено опытомъ пониженіе точки плавленія въ

$$0^{\circ},0075 \text{ С.}$$

на каждую прибавочную атмосферу (§ 134) давленія. Можно выразить это въ грубой формѣ, сказавъ, что

подъ давлѣніемъ вѣса одной тонны на квадратный дюймъ ледъ плавится на одинъ градусъ С. ниже своей обыкновенной точки плавленія.

[Кстати замѣтимъ, что плотность льда составляетъ лишь около 0,92 плотности воды, такъ что вещество воды при плавленіи сокращается на восемь процентовъ].

Многія послѣдствія этого важнаго факта были общеизвѣстны прежде, чѣмъ указанъ былъ самый фактъ.

Въ одной формѣ онъ, конечно, былъ хорошо извѣстенъ сотни лѣтъ тому назадъ, именно въ формѣ опыта, который мы производимъ, скатывая снѣжный шарикъ. Школьники хорошо знаютъ, что послѣ очень морозной ночи снѣгъ не «катается»: производимое ихъ руками давленіе недостаточно сильно для этого. Но если нѣкоторое время подержать снѣгъ въ рукахъ, чтобы онъ согрѣлся приблизительно до точки плавленія, то онъ опять получаетъ способность «кататься» или, лучше, «быть скатываемымъ». Замѣчая колею, оставленную въ снѣгу колесомъ, мы видимъ, что снѣгъ въ ней раздавленъ, и всегда вслѣдъ за проѣздомъ нагруженной телеги — навѣрное послѣ проѣзда двухъ или трехъ — снѣгъ оказывается сплоченнымъ въ чистый прозрачный ледъ. То же самое происходитъ постепенно, когда достаточно народа проходитъ по мостовой, покрытой снѣгомъ; и во всѣхъ этихъ случаяхъ наблюдаемый результатъ обусловливается незначительнымъ пониженіемъ точки замерзанія. Теперь мы можемъ понять, какимъ образомъ огромныя ледниковыя массы (глетчеры) медленно, подобно вязкому тѣлу, подвигаются впередъ въ силу того своеобразнаго свойства льда, о которомъ идетъ рѣчь, эти массы подъ большимъ давлѣ-

ніемъ становятся какъ бы вязкимъ тѣломъ. Давленіе внизу въ массѣ ледника, конечно, должно быть очень велико, и такъ какъ вся масса—особенно лѣтомъ—пропитана водою, то температура льда никогда не можетъ (кромя нѣкоторыхъ исключительныхъ случаевъ, и то близъ свободной поверхности) упасть значительно ниже точки замерзанія. При поступательномъ движеніи массы, каждое мгновеніе въ ней будутъ мѣста, гдѣ давленіе окажется наибольшимъ—гдѣ именно вязкое тѣло, поставленное въ тѣ же условія, уступило бы. Ледъ не обладаетъ такою способностью уступать давленію; но въ немъ есть нѣчто обуславливающее совершенно сходный результатъ: тамъ, гдѣ давленіе сосредоточивается, ледъ плавится, и такъ какъ вода занимаетъ меньшій объемъ, чѣмъ ледъ, изъ котораго она произошла, то сейчасъ же освобождается мѣсто, и давленіе переносится въ другую часть массы. Вода такимъ образомъ освобождается отъ давленія, уступая вслѣдствіе своего собственного сокращенія при плавленіи. Но по прекращеніи давленія вода еще остается при температурѣ, которая ниже точки замерзанія, и поэтому тотчасъ же снова превращается въ ледъ. Все дѣйствіе состоитъ въ томъ, что ледъ на мгновеніе плавится въ мѣстѣ наибольшаго давленія и уступаетъ совершенно подобно вязкому тѣлу. Но какъ только онъ уступить и освободится самъ собою отъ давленія, такъ сейчасъ же образуется снова, и этотъ процессъ совершается непрерывно по всей массѣ; такимъ образомъ ледъ, хотя и вслѣдствіе особенной свойственной ему причины, является какъ бы вязкою жидкостью, поставленною въ тѣ же самыя внѣшнія условія.

Первый, кто повидимому воспроизвелъ то же явленіе на опытѣ въ маломъ видѣ, былъ Дольфусъ-Аусетъ (Doll-

fuss-Ausset), показавшій, что, сжимая нѣсколько кусковъ льду помощью гидравлическаго пресси, можно было ихъ расплавить, а прекращая давленіе, заставить ихъ отвердѣть въ сплошной кусокъ. Но онъ нашелъ, что съ очень холоднымъ льдомъ опытъ не удастся. Это значитъ, какъ мы теперь видимъ, что даже посредствомъ гидравлическаго пресси онъ не могъ произвести достаточно сильнаго давленія.

Если открыть отверстіе на концѣ цилиндра, въ которомъ сжать снѣгъ помощью гидравлическаго пресси, то изъ отверстія постепенно выдавливается наружу цилиндръ или проволока плотнаго льду, точно такъ, какъ это бываетъ при выдѣлкѣ проволоки изъ мягкаго металла. Механизмъ явленія различенъ, но результатъ одинъ и тотъ же.

Другой, простой, но поучительный опытъ состоитъ въ томъ, что вокругъ поддерживаемаго горизонтально ледянаго бруска перебрасываютъ проволочную петлю и подвѣшиваютъ къ проволоку грузъ. Грузъ постепенно продавливаетъ проволоку чрезъ ледъ, который таетъ впереди проволоки и тотчасъ же снова образуется позади нея; и проволока пройдетъ насквозь (какъ при разрѣзываніи сыра или мыла), оставивъ брусокъ такимъ же крѣпкимъ, какъ прежде.

146. Каждый знаетъ, что корка, образующаяся на расплавленномъ и начавшемъ застывать воскѣ, тонетъ въ жидкости, если ее сломать. То же самое наблюдалось надъ озерами изъ лавы, какъ напр. на Гавайи, гдѣ кора «ломается въ различныхъ направленіяхъ, и одна половина озера за другою заливается слоемъ свѣжей раскаленной до-красна лавы, между тѣмъ какъ кора,

морщась и ломаясь при охлажденіи, исчезаетъ изъ виду» *).

Какъ вліяніе давленія на точку плавленія льда позволяетъ намъ понять пластичность льда глетчеровъ, такъ точно явленіе, которое сейчасъ описано, позволяетъ съ большою вѣроятностью указать причину, почему внутренность земли на самомъ дѣлѣ тверда, хотя составляющіе ее матеріалы находятся при температурѣ далеко высшей, чѣмъ точки ихъ плавленія при обыкновенныхъ условіяхъ.

Ибо, какъ мы увидимъ, когда будемъ говорить (въ главѣ о *проводимости* теплоты) о внутреннихъ температурахъ земли, едва ли можетъ быть сомнѣніе въ томъ, что температура на глубинѣ нѣсколькихъ сотъ миль отъ земной поверхности должна быть очень высока—навѣрное гораздо выше обыкновенной точки плавленія лавы. Съ другой стороны, какъ показано В. Томсономъ на основаніи величины приливовъ, нѣтъ сомнѣнія, что въ цѣломъ земля почти столь же тверда, какъ стальной шаръ такихъ же размѣровъ.

Эти два повидимому противорѣчивыхъ условія легко примиряются, если мы предположимъ, что матеріалы земной внутренности въ общемъ обладаютъ свойствомъ, подобно лавѣ, при плавленіи расширяться—ибо громадное давленіе, которому они подвергаются со стороны вышележащихъ слоевъ, вѣроятно, достаточно для того, чтобы поднять ихъ точку плавленія выше ихъ дѣйствительной температуры. Такимъ образомъ вещества земной внутренности могутъ оставаться твердыми даже въ бѣлокапильномъ жару. Но если, вслѣдствіе охлажденія

*) J. W. Nichol, *Proc. R. S. E.*, 1875—6, p. 117.

и стягиванія нижнихъ слоевъ твердой земной коры, давленіе гдѣ-либо значительно ослабѣетъ, то освободившіяся отъ него массы должны будутъ (почти со взрывомъ) расплавиться и при этомъ значительно расширяться. Обстоятельство это, повидимому, существеннымъ образомъ связано съ землетрясеніями и поднятіями почвы.

[Мимоходомъ замѣтимъ, что если бы земля была сплошь жидкою и имѣла *равномерную* плотность, равную ея настоящей средней плотности, то давленіе въ разстояніи нѣсколькихъ сотенъ миль отъ ея поверхности возрастало бы въ отношеніи около 800 атмосферъ (т. е. приблизительно $5\frac{1}{2}$ тоннъ вѣса на квадратный дюймъ) на каждую милю глубины].

Гопкинсъ нашелъ, что точка плавленія воска повышается приблизительно на 10° С дѣйствіемъ давленія въ 500 атмосферъ, а Бунзенъ даетъ повышение точки плавленія въ $3^{\circ},5$ С для парафина при 100 атмосферахъ давленія.

147. Мы должны теперь рассмотретьъ другую сторону опытнаго положенія § 142.

То обстоятельство, что температура смѣси твердаго тѣла и жидкости остается при точкѣ плавленія, сколько бы теплоты ни сообщалось, до тѣхъ поръ, пока не расплавится послѣдняя частичка, Блэкъ объяснялъ (исходя изъ гипотезы о матеріальности теплоты) предположеніемъ, что жидкость образуется изъ твердаго тѣла просто чрезъ присоединеніе извѣстнаго количества теплорода (caloricum). Такимъ образомъ жидкость рассматривалась какъ родъ химическаго соединенія твердаго тѣла съ эквивалентнымъ количествомъ теплорода. Такъ какъ присоединеніе не оказывало вліянія на температуру тѣ-

ла, то Блэкъ ввелъ для этого предполагаемаго тепло-роднаго эквивалента названіе *скрытой* теплоты—названіе очень удачное при знаніяхъ того времени, ибо было найдено, что жидкость при отвердѣваніи отдавала то же самое количество теплоты, какое поглощалось твердымъ тѣломъ при плавленіи.

Къ сожалѣнію, слово это не годится съ нашей современной точки зрѣнія; однако, оно такъ привилось въ нашей рѣчи (подобно *пустотѣ* и *центробѣжной силѣ*), что мы, конечно, не скоро отъ него избавимся. Но не произойдетъ затрудненія, если имѣть въ виду, что, говоря о скрытой теплотѣ, мы разумѣемъ лишь только то, что извѣстное количество теплоты всегда требуется для измѣненія молекулярнаго состоянія вещества, даже если температура его не измѣняется.

148. Мы до сихъ поръ почти ничего не знаемъ о томъ, въ какой вообще формѣ энергія существуетъ въ тѣлахъ; и большое зло порождено (почти съ самаго же времени Блэка) предположеніемъ, что тѣла должны содержать извѣстное количество какой-то «ощутимой» или «термометрической» теплоты. Пока мы не будемъ знать, хотя по крайней мѣрѣ отчасти, природу внутренняго механизма, связывающаго частицы вещества, до тѣхъ поръ совершенно тщетными будутъ разсужденія по вопросамъ о содержащейся въ тѣлѣ теплотѣ, если идти дальше опредѣленія количествъ теплоты, принимаемой тѣломъ или отдаваемой имъ въ различныхъ фазахъ какого-нибудь процесса. См. § 74.

149. Но если мы только обратимъ вниманіе на количество работы, необходимое для превращенія въ тонкій порошокъ даже самаго рыхлаго тѣла, и далѣе, если мы подумаемъ, сколь безконечно совершеннѣе дробится

такое тѣло при плавленіи, то мы легко поймемъ, что значительная часть энергіи, придаваемой тѣлу въ формѣ теплоты, должна расходоваться на чисто механическую работу—на то, чтобы передвинуть частицы въ сравнительно свободное положеніе, занимаемое ими въ жидкости, противъ тѣхъ молекулярныхъ силъ, которыя прежде связывали ихъ въ твердомъ тѣлѣ.

150. Съ такими поясненіями мы удерживаемъ названіе *скрытой теплоты* какъ общее выраженіе, приложимое ко всѣмъ случаямъ измѣненія молекулярнаго состоянія, въ которыхъ тѣлу можетъ быть сообщена энергія *въ тепловой формѣ* безъ измѣненія его температуры.

[Пусть учащійся обратитъ особенное вниманіе на только что подчеркнутыя слова, ибо то же самое количество энергіи можно сообщить куску льда многими другими путями безъ того, чтобы расплавить его или измѣнить его температуру—напр., подымая ледъ на надлежащую высоту противъ силы тяготѣнія или сообщая ему надлежащую скорость].

Такимъ образомъ *скрытая теплота воды* численно будетъ измѣряться *количествомъ единицъ теплоты* (§ 55), которое должно сообщить *фунту льда* при 0°C для превращенія его *въ фунтъ воды* при 0°C .¹⁾

Это есть (§ 9), очевидно, опредѣленное количество: ибо температура, входящая въ опредѣленіе, предполагаетъ давленіе въ 1 атмосферу.

151. Опытное опредѣленіе величины скрытой теплоты можетъ быть произведено многими путями, но всѣ

¹⁾ Точно также: скрытая теплота воды измѣрется числомъ единицъ теплоты (см. примѣч. въ § 55), которое должно сообщить одному килограмму льда при 0°C , чтобы превратить его въ килограммъ воды при 0°C .

обычные способы основываются на прямомъ сравненіи дѣйствія равныхъ количествъ теплоты на ледъ и на воду.

Обыкновенная лекціонная форма опыта состоитъ въ томъ, что фунтъ льда при 0° С обливаютъ фунтомъ воды около 80° С и все тщательно размѣшиваютъ. Если приняты надлежащія предосторожности противъ всякихъ потерь, то оказывается, что при этихъ условіяхъ, какъ только весь ледъ растаетъ, окончательная температура будетъ лишь 0° С.

Если предположить—а это очень близко къ дѣйствительности—что количество теплоты потребное для повышения температуры фунта воды на одинъ градусъ, одно и то же во всемъ промежуткѣ отъ 0° до 80° С., то очевидно, что фунтъ горячей воды долженъ былъ потерять 80 единицъ теплоты, которыя сообщились фунту льда и расплавили его, не повысивъ его температуры. Отсюда слѣдуетъ (согласно опредѣленію скрытой теплоты, § 150), что 80 есть скрытая теплота воды. Изъ опытовъ Персона и другихъ выходитъ, что значеніе ея точнѣе выражается числомъ 79,25. Экспериментальная часть работы не представляетъ очень большихъ трудностей; но способъ заключенія изъ ея результатовъ зависитъ до нѣкоторой степени отъ взгляда, который мы можемъ составить себѣ относительно того, *совершается-ли переходъ отъ льда къ водѣ внезапно или постепенно.*

152. Нѣтъ сомнѣнія, что переходъ изъ твердаго состоянія въ жидкое, по крайней мѣрѣ во многихъ веществахъ, совершается постепенно, а не внезапно. Всякій знаетъ, какъ воскъ и параффинъ размягчаются при постепенномъ возвышеніи температуры. *Свариваніе* желѣза и платины при высокихъ температурахъ есть другое явленіе.

ніе того же рода. Многіе выдаючіеся авторитеты высказываютъ мнѣніе, что нѣчто подобное происходитъ и со льдомъ. То, что мы имѣли бы еще сказать по этому вопросу, лучше будетъ отложить до разсмотрѣнія началъ термодинамики въ ихъ цѣломъ. Ясно, что быстрое возрастаніе удѣльной теплоты какъ разъ около точки плавленія могло бы, если бы оно осталось незамѣченнымъ, повести къ большому числу для скрытой теплоты, опредѣленной какъ выше. Но ясно также, что это объясненіе дѣйствительно только въ томъ случаѣ, если ледъ, съ котораго вода стекаетъ, самъ по себѣ немного холоднѣе 0° С (кромѣ поверхностныхъ слоевъ). Форбсъ и Бальфуръ Стюартъ утверждаютъ, что температура массы льда, быстро истолченнаго, оказывается всегда немного ниже точки замерзанія.

153. По большой величинѣ скрытой теплоты вода занимаетъ среди жидкостей почти исключительное положеніе. Слѣдующая табличка содержитъ нѣсколько общихъ данныхъ по этому предмету.

СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНІЯ.

Вода	79,25
Фосфорнонатровая соль.	67,0
(кристаллизованная).	
Цинкъ	28,1
Сѣра	9,4
Свинецъ	5,4
Ртуть	2,8

Не слѣдуетъ забывать, что данныя здѣсь числа обозначаютъ количества единицъ теплоты, которыя какъ

разъ достаточны для расплавленія фунта каждого изъ этихъ веществъ безъ измѣненія его температуры ¹⁾).

154. Мы уже ссылались на внезапное измѣненіе объема, которое обыкновенно происходитъ при плавленіи. Измѣненіе это вообще состоитъ въ расширеніи; но вода, чугуны, типографскій металлъ ²⁾ и нѣкоторыя другія тѣла сжимаются. Такъ какъ отвердѣваніе есть процессъ



Рис. 26

въ точности обратный плавленію, то онъ сопровождается выдѣленіемъ скрытой теплоты и возвращеніемъ къ прежнему объему. Отсюда та точность, съ какою чугуны и типографскій металлъ при отливкѣ выполняютъ каждую

¹⁾ Числа, конечно, остаются тѣми же, если въ опредѣленіе какъ тепловой единицы, такъ и скрытой теплоты плавленія ввести килограммъ вмѣсто фунта.

²⁾ Сплавъ свинца съ сурьмой, содержащій 20—25% сурьмы и употребляющійся для отливки типографскихъ шрифтовъ.

малѣйшую трещину въ формѣ. Отъ того же разрываются во время мороза (а не *послѣ*, какъ полагаетъ большинство даже «образованныхъ» людей) водопроводныя трубы. Давленіе, которое необходимо, чтобы воспрепятствовать замерзанію воды въ сосудѣ, почти совершенно ею наполненномъ, громадно—предполагая, что температура на нѣсколько градусовъ ниже обычной точки замерзанія; оно достаточно, какъ показали испытанія, для того, чтобы разорвать крѣпчайшую бомбу. Количество работы, которое можетъ быть произведено фунтомъ воды при замерзаніи ея въ данныхъ условіяхъ, можетъ быть вычислено, по крайней мѣрѣ приблизительно, какъ мы увидимъ въ термодинамикѣ. Мы уже указывали, говоря о пониженіи точки замерзанія дѣйствіемъ давленія (§ 145), что необходимо давленіе одной тонны вѣса на квадратный дюймъ, чтобы воспрепятствовать образованію льда при температурѣ только на одинъ градусъ ниже нуля.

155. Процессъ растворенія твердаго тѣла въ жидкости, по крайней мѣрѣ, поскольку онъ не зависитъ отъ химическаго дѣйствія, находится въ тѣсной аналогіи съ плавленіемъ и очевидно долженъ (§ 149) требовать сообщенія энергіи. Последняя обыкновенно заимствуется въ формѣ теплоты отъ самаго же тѣла и отъ растворителя, также какъ и отъ окружающихъ тѣлъ.

Раствореніе твердаго тѣла въ жидкости обыкновенно сопровождается охлажденіемъ. Охлажденіе можетъ быть въ нѣкоторыхъ случаяхъ частью или сполна покрыто, иногда съ избыткомъ, теплотою, развивающеюся вслѣдствіе химическаго дѣйствія.

Одинъ изъ обыкновеннѣйшихъ приемовъ этого рода для произведенія холода (т. е. для того, чтобы приводить теплоту въ скрытое состояніе) есть раствореніе

азотнокислаго амміака (азотноаммоніевої соли) въ равномъ количествѣ воды. Если взять соль и воду при обыкновенной температурѣ, напр. при 10° C, или 50° F, то температура раствора падаетъ примѣрно до -15° C. Нѣсколько большее охлажденіе происходитъ при обливаніи снѣга продажною соляною кислотою.

Но далеко низшія температуры, достигаемыя нынѣ такими средствами, производятся смѣшиваніемъ эфира съ твердымъ угольнымъ ангидридомъ или другими тѣлами, которыя газообразны при обыкновенныхъ условіяхъ температуры и давленія. Температуры могутъ быть еще значительно понижены помѣщеніемъ смѣси въ приемникъ, изъ котораго выкачивается воздухъ. Наттереръ опредѣляетъ низшую достигнутую имъ этимъ путемъ температуру приблизительно въ -140° C, что составляетъ болѣе половины отстоянія абсолютнаго нуля отъ точки замерзанія (§§ 96, 125). Вѣроятно, результаты еще болѣе поразительные могутъ быть нынѣ получены помощью твердаго водорода ¹⁾.

156. Если два твердыхъ тѣла, будучи смѣшаны въ кристаллахъ или порошокѣ, заставляютъ другъ друга плавиться, то каждому изъ нихъ, конечно, должна быть сообщена ихъ скрытая теплота извнѣ, поскольку она не развивается вслѣдствіе химическаго соединенія. Этимъ объясняется общеизвѣстное дѣйствіе охлаждающей смѣси изъ снѣга и обыкновенной соли или изъ соли и толченаго льда (§ 132). Если соль предварительно была охлаждена до 0° C, то температура смѣси падаетъ приблизительно до -20° C.

157. Наоборотъ, когда вещество кристаллизуется

¹ См. примѣч. къ § 174.

изъ раствора, мы вообще имѣемъ развитіе теплоты. Это очень хорошо показываетъ пересыщенный растворъ сѣрнонатріевой (глауберовой) или уксунонатріевой соли: такой растворъ быстро закристаллизовывается, если бросить въ него малѣйшую частичку твердой соли. Въ случаѣ уксунонатріевой соли почти вся вода вбирается солью, какъ кристаллизационная.

158. *Содержаніе §§ 141—157.* — Законъ плавленія. Дѣйствіе давленія. Точки плавленія нѣсколькихъ твердыхъ тѣлъ. Отношеніе льда и лавы къ давленію. Слѣдствія по отношенію къ ледникамъ и слоямъ, лежащимъ подъ земною корою. Скрытая теплота плавленія. Скрытая теплота различныхъ жидкостей. Раствореніе. Охлаждительныя смѣси. Теплота, развивающаяся при отвердѣваніи.

ГЛАВА IX.

Измѣненіе молекулярнаго состоянія. Испареніе и ожидженіе.

159. См. §§ 46, 47. Мы видѣли (§ 152), что еще не установлено, совершается ли переходъ изъ твердаго состоянія въ жидкое *точно* при опредѣленной температурѣ, называемой точкою плавленія. Что касается перехода изъ жидкаго (и въ нѣкоторыхъ по крайней мѣрѣ случаяхъ изъ твердаго) состоянія въ парообразное, то нѣтъ сомнѣнія, что оно происходитъ при всѣхъ температурахъ, но тѣмъ легче, чѣмъ выше температура, вплоть до такъ-называемой точки кипѣнія.

Кому не приходилось замѣчать, что даже въ самые холодные зимніе дни — въ особенности въ вѣтреноую погоду — ледъ мало-по-малу исчезаетъ съ троттуаровъ, не смотря на то, что онъ всегда представляется намъ твердымъ и крѣпкимъ. Ледъ въ самомъ дѣлѣ постоянно испаряется, хотя и очень медленно. Еще неизвѣстно, переходитъ-ли онъ при этомъ въ тонкомъ поверхностномъ слоеъ чрезъ жидкое состояніе, или нѣтъ. — Далѣе, перегонка жидкостей часто производится въ

большихъ размѣрахъ заводскимъ путемъ при температурахъ, удерживаемыхъ завѣдомо ниже точки кипѣнія жидкости. Испареніе растворовъ соли въ чренахъ представляетъ еще прекрасный примѣръ.—Весь содержащійся въ воздухѣ водяной паръ, за исключеніемъ лишь очень малой доли, поднялся съ поверхности океановъ, озеръ, влажной почвы, при температурахъ далеко ниже точки кипѣнія.

160. *Кипѣніе.* Опытъ позволяетъ намъ установить для этого явленія точно такой же законъ, какъ въ § 142, именно:

При неизмѣнномъ давленіи, для свободной поверхности каждой жидкости существуетъ опредѣленная точка кипѣнія; и (предполагая, что масса перегревается) температура остается на этой точкѣ, сколько бы теплоты ни сообщалось, до тѣхъ поръ, пока не испарится послѣдняя частичка жидкости.

Вліяніе давленія на точку кипѣнія можетъ быть вычислено, какъ и вліяніе его на точку плавленія; но такъ какъ намъ неизвѣстно вещества, которое (при одинаковыхъ условіяхъ температуры и давленія) занимало бы въ парообразномъ состояніи менышій объемъ, нежели въ жидкомъ, то мы можемъ утверждать, что дѣйствіе давленія во всѣхъ случаяхъ выразится *повышеніемъ* точки кипѣнія.

Мы уже привели выше (§ 60) нѣкоторые объясненія и опытные данныя о занимающемъ насъ явленіи, поскольку оно касается воды. Теперь мы рассмотримъ опытный законъ въ его цѣломъ подробнѣе, въ порядкѣ сходномъ съ тѣмъ, какой былъ нами принятъ для соответственнаго закона плавленія.

161. Какъ типическій примѣръ мы беремъ воду —

жидкость наиболее важную, которая именно вследствие этого наиболее тщательно изучена. Первая приблизительно точныя указанія объ испареніи принадлежать Дальтону. Численныя данныя большой точности распространяющіяся на широкій промежутокъ температуръ, даны были въ послѣднее время Реньо. Но лишь поразительно новыя и чрезвычайно важныя въ теоретическомъ отношеніи результаты, полученныя Эндрьюсомъ въ 1869 году, обнаружили, въ чемъ истинное различіе между паромъ и газомъ.

162. Если сосудъ съ водою помѣститъ въ пріемникъ, изъ котораго вытянуть воздухъ, то сейчасъ же начинается испареніе; оно продолжается (очень быстро) до тѣхъ поръ, пока давленіе паровъ въ пріемникѣ не достигнетъ извѣстной величины, которая оказывается зависящею единственно отъ температуры.

Если пріемникъ снабженъ поршнемъ, вдвигая или вытягивая который мы будемъ значительно уменьшать или увеличивать объемъ, то давленіе пара все-же остается неизмѣняемымъ, ибо при увеличеніи объема тотчасъ образуется новое количество пара, при уменьшеніи же часть пара сгущается въ жидкость. На дѣлѣ это легко производится введеніемъ капли воды въ трубку, наполненную ртутью, какъ для опыта Торичелли. Когда трубка опрокинута въ сосудъ со ртутью, тогда оказывается, что ртуть стоитъ въ ней на *опредѣленную* величину ниже, чѣмъ въ барометрѣ, и разность высотъ не измѣнится, если трубку погрузить глубже въ ртуть. [Это представлено на рис. 27, гдѣ *a* показываетъ уровень ртути въ барометрѣ (съ торичеллиевой пустотой надъ ртутью), а *b*—уровень ртути въ трубкѣ, въ которую введена капля воды. Рис. 28 изображаетъ явленія

одновременно въ трехъ барометрическихъ трубкахъ различной длины, изъ которыхъ въ каждую введено по каплѣ воды].

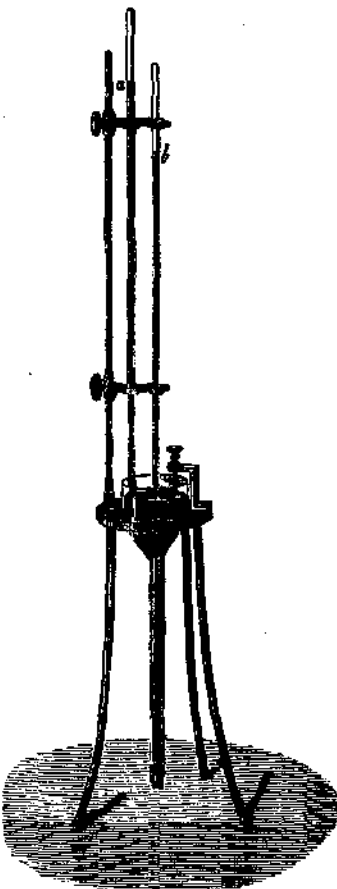


Рис. 27.

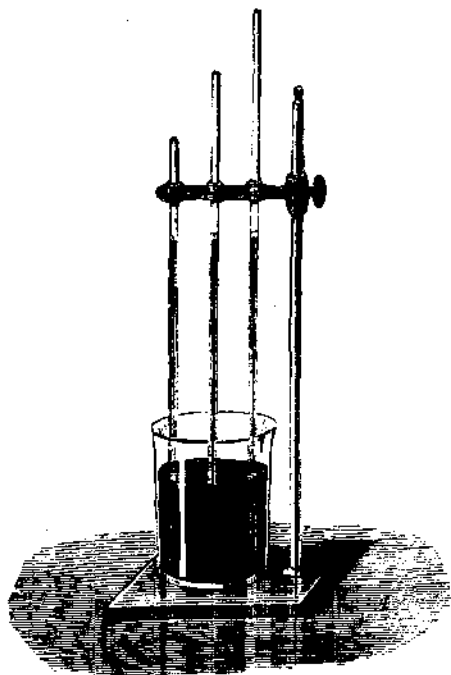


Рис. 28.

То же получается въ окончательномъ результатѣ,

лишь не такъ быстро, если пріемникъ содержитъ воздухъ. Единственное вліяніе, оказываемое присутствіемъ воздуха, состоитъ въ замедленіи парообразованія, но процессъ длится, какъ прежде, до тѣхъ поръ, пока давленіе пара не достигнетъ величины, свойственной водѣ данной температуры; и образование пара замедляется тѣмъ больше, чѣмъ воздухъ плотнѣе.

163. Паръ, находящійся въ состояніи равновѣсія въ соприкосновеніи съ избыткомъ жидкости, называется *насыщеннымъ паромъ*, и мы можемъ выразить Дальтоново положеніе въ слѣдующей формѣ:

Давленіе насыщеннаго пара какой-либо жидкости зависитъ только отъ температуры.

[N. В.—Учащійся замѣтитъ, что во многихъ старыхъ книгахъ, какъ и въ слишкомъ значительномъ числѣ современныхъ, вмѣсто слова *давленіе* употребляется по отношенію къ насыщенному пару неподходящее слово *упругость*. Это злоупотребленіе въ особенности поддерживается химиками, которые почти неизмѣнно говорятъ объ «упругости пара»].

164. Когда жидкость такимъ образомъ находится въ равновѣсіи со своимъ собственнымъ паромъ, предположимъ, что паръ удаляютъ помощью воздушнаго насоса почти столь же быстро, какъ онъ образуется. Тогда, очевидно, новое количество жидкости быстро превращается въ паръ: при этомъ можно наблюдать, что онъ исходитъ не только съ поверхности жидкости, но изъ всей ея массы въ видѣ пузырей, которые отдѣляются преимущественно съ острыхъ оконечностей и угловъ твердыхъ тѣлъ, погруженныхъ въ жидкость. Это свободное и быстрое отдѣленіе пара есть то, что называется *кипѣніемъ*. И мы видимъ такимъ образомъ, что

Точка кипѣнія жидкости есть та температура, при которой давленіе насыщеннаго пара жидкости равняется давленію, производимому на ея свободную поверхность.

ДАВЛЕНІЕ НАСЫЩЕННАГО ВОДЯНОГО ПАРА (РЕНЬО).

Температура С.	Давленіе въ атмосферахъ.	Температура С.	Давленіе въ атмосферахъ.
0° . . .	0,006	120° . . .	1,962
10 . . .	0,012	130 . . .	2,671
20 . . .	0,023	140 . . .	3,576
30 . . .	0,042	150 . . .	4,712
40 . . .	0,072	160 . . .	6,120
50 . . .	0,121	170 . . .	7,844
60 . . .	0,196	180 . . .	9,929
70 . . .	0,306	190 . . .	12,425
80 . . .	0,466	200 . . .	15,380
90 . . .	0,691	210 . . .	18,848
100 . . .	1,000	220 . . .	22,882
110 . . .	1,415	230 . . .	27,535.

165. По поводу этой очень поучительной таблицы (данной Реньо на стр. 728 его замѣчательнаго *Rélation des Expériences* и т. д., *Mém. de l'Ac. des Sciences*, 1847) мы сдѣлаемъ нѣсколько замѣчаній.

а) Мы видимъ, что давленіе насыщеннаго пара очень быстро возрастаетъ съ повышеніемъ температуры.

Такъ, возвышеніе температуры отъ 100° до 180° увеличиваетъ давленіе отъ одной атмосферы примѣрно до десяти, между тѣмъ какъ дальнѣйшее повышеніе лишь на 40°С доводитъ давленіе приблизительно до двадцати трехъ атмосферъ.

Сравнимъ это отношеніе съ соответственнымъ отно-

щеніемъ газа, напр. воздуха (§ 124), гдѣ давленіе (при постоянномъ объемѣ) возрастаетъ приблизительно пропорціонально абсолютной температурѣ,—и мы увидимъ, въ какой мѣрѣ, въ смыслѣ вѣроятности взрыва, двигатель, дѣйствующій нагрѣтымъ воздухомъ, представляетъ менѣе опасности сравнительно съ паровою машиной, работающею (насыщеннымъ паромъ) при одинаково высокой температурѣ.

б) Воду можно привести въ кипѣніе при обыкновенныхъ температурахъ, помѣстивъ ее въ приемникъ воз

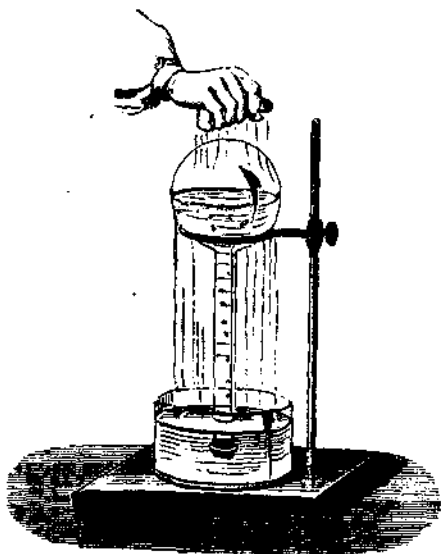


Рис. 29.

душнаго насоса и производи достаточно сильное разрѣженіе. Такъ, если вода взята при 10°C (50°F), то она закипитъ, когда давленіе упадетъ до 0,012 атмосферы

(или, точнѣе, до 9,16 миллиметровъ ртути). Подобный опытъ представляетъ то замѣчательное явленіе, что по мѣрѣ того, какъ кипѣніе продолжается, вода постепенно становится *холоднѣе*, такъ что для поддержанія процесса требуется дальнѣйшее выкачиваніе воздушнымъ насосомъ. Это будетъ объяснено въ одномъ изъ слѣдующихъ §§ при разсмотрѣніи скрытой теплоты водяного пара.

Весьма наглядная форма того же опыта состоитъ въ слѣдующемъ. Въ открытой колбѣ кипятятъ воду какъ можно сильнѣе, чтобы изгнать парами большую часть воздуха, и плотно закупоривъ, переворачиваютъ колбу горломъ внизъ (рис. 29). Если теперь облить дно колбы холодною водою, то пары въ колбѣ стущаются, давленіе на воду вслѣдствіе этого уменьшается, и она тотчасъ же закипаетъ. Обливаніе дна кипящею водою разомъ прекращаетъ кипѣніе. Если воздухъ былъ почти совершенно удаленъ, то помощью достаточно сильнаго охлажденія можно вызвать кипѣніе воды даже тогда, когда содержимое колбы охладилось до комнатной температуры.

с) Температурой, при которой кипитъ вода (въ маленькомъ аппаратѣ въ родѣ изображеннаго на рис. 21, § 134), можно воспользоваться, какъ средствомъ для измѣренія производимаго на воду давленія. Такимъ образомъ Уольстонъ замѣнялъ барометръ термометромъ при измѣреніи высоты горъ. Термометръ дѣйствительно представляетъ многія выгоды для переноски, такъ какъ занимаетъ меньше мѣста и гораздо менѣе подверженъ ломкѣ. Слѣдующая приближенная формула, выведенная на основаніи таблицы Реньо (*Relation*, p. 633), показываетъ, какъ измѣняется точка кипѣнія при обыкновенныхъ колебаніяхъ барометра въблизи морского уровня.

Температура С.	Давленіе.	
	Атмосферы.	Дюймы.
$99^{\circ} \pm \tau$	$0,9647 \pm 0,0348\tau$	$28,87 \pm 1,04\tau$

[Эта формула не должна быть употребляема для значеній τ значительно превосходящихъ 2. Для болѣе широкихъ предѣловъ или для тѣхъ же, когда требуется большая точность, должно пользоваться всею таблицей Реньо].

Говоря примѣрно, точка кипѣнія воды понижается на 1°С при поднятіи вертикально вверхъ на 960 футовъ

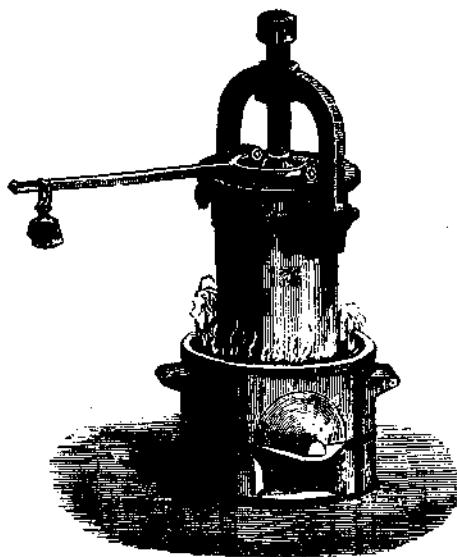


Рис. 30.

надъ уровнемъ моря. На вершинѣ Монблана Бравэ и Мартенъ въ 1844 г. нашли показаніе *инсометрическаго* термометра ¹⁾ равнымъ $84^{\circ},4\text{С}$.

¹⁾ Т. е. термометра, назначеннаго для измѣренія высотъ.

d) Мы видимъ, почему пониженіе давленія уменьшаетъ растворяющую и разваривающую способность воды, а повышеніе давленія увеличиваетъ ту и другую. Такъ, на вершинѣ Монблана чай даетъ слабый настой. Съ другой стороны, *Папеновъ котелъ* (дигесторъ), употребляемый для извлеченія растворимыхъ веществъ изъ костей и пр., есть очень крѣпкій металлическій сосудъ, въ которомъ вода, подъ давленіемъ своихъ собственныхъ насыщенныхъ паровъ, надежно можетъ быть нагрѣваема до температуръ гораздо высшихъ ея обыкновенной точки кипѣнія.

166. Приблизительное выраженіе для количества теплоты, которое поглощается испареніемъ воды при различныхъ температурахъ, было дано Уаттомъ и другими. Но вопросъ оставался темнымъ, пока его не разъяснилъ Реньо. Онъ даетъ слѣдующую простую формулу для того, что онъ называетъ *полною теплотою испаренія* (*chaleur totale de vaporisation*) при какой-нибудь данной температурѣ t :

$$606,5 + 0,305t.$$

Такъ, одинъ фунтъ насыщеннаго при 0°C водяного пара, сгущаясь въ воду при 0° , выдѣляетъ 606,5 единицъ теплоты; если же его начальная температура была 100°C , то онъ выдѣлялъ бы, переходя въ воду при 0° , количество теплоты равное $606,5 + 30,5$, или 637 единицамъ.

Въ слѣдующей главѣ мы рассмотримъ (весьма малое) измѣненіе удѣльной теплоты воды съ температурою. Если принять его въ расчетъ при употребленіи данной выше формулы, то по Реньо скрытая теплота водяного пара при различныхъ температурахъ падаетъ

съ	606,5	при	0°С
до	536,5	при	100°
и до	464,3	при	200°.

Здѣсь скрытая теплота пара при какой-нибудь температурѣ есть то количество теплоты, которое нужно для превращенія фунта воды въ паръ той же самой температуры.

Для большей части практическихъ цѣлей можно считать, основываясь на только что приведенныхъ числахъ, что скрытая теплота пара убываетъ пропорціонально возвышенію температуры, и именно въ размѣрѣ 11,5 процентовъ на каждые сто градусовъ надъ точкою замерзанія. По гипотезѣ Уатта выходило, что количество теплоты потребное для превращенія фунта воды при 0°С въ паръ какого угодно давленія—т. е. полная теплота испаренія—есть величина постоянная. Если бы это было вѣрно, то, складывая каждое изъ данныхъ выше чиселъ съ соотвѣтственнымъ числомъ градусовъ, мы должны бы получить приблизительно равныя суммы. Но этого нѣтъ, и мы видимъ, что допущеніе Уатта ошибочно: оно ведетъ къ числамъ, которыхъ недочетъ составляетъ около пяти процентовъ истинной величины на каждые сто градусовъ выше 0°С.

Мы будемъ имѣть случай полнѣе рассмотреть этотъ вопросъ въ термодинамикѣ.

167. По Эндрьюсу скрытая теплота одного фунта пара нѣсколькихъ обыкновенныхъ жидкостей, кипящихъ подъ обыкновеннымъ атмосфернымъ давленіемъ, выражается слѣдующими числами:

СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ИСПАРЕНІЯ ПОДЪ ДАВЛЕНІЕМЪ 1 АТМОСФЕРЫ.

Вода	536,0
Спиртъ	202,4
Эфиръ	90,5
Бромъ	45,6

Здѣсь вода опять стоитъ сравнительно высоко. И такъ какъ мы уже знаемъ, что скрытая теплота водяного пара тѣмъ больше, чѣмъ ниже температура, при которой происходитъ испареніе, то мы можемъ видѣть, какое огромное количество теплоты потребно на испареніе воды съ поверхности океановъ, и какъ велико то количество тепла, которое освобождается при сгущеніи пара въ туманъ и облака. Это ведетъ насъ къ разсмотрѣнію процесса сгущенія съ нѣкоторыми изъ его слѣдствій.

168. Простой опытъ чрезвычайно наглядно указываетъ на большую скрытую теплоту водяного пара. Стоитъ только пропустить паръ изъ кипятивника въ сосудъ съ отмѣреннымъ количествомъ воды при 0°. Сперва паръ сгущается тотчасъ же по достиженіи воды; но по мѣрѣ того, какъ вода дѣлается теплѣе, паръ отходитъ все дальше и дальше отъ конца приводящей его трубки, образуя все увеличивающійся пузырь, на поверхности котораго постоянно идетъ сгущеніе. Когда вода нагреется до точки кипѣнія, паръ начинаетъ свободно проходить черезъ нее. Лишь только это достигнуто, отнимемъ приводящую паръ трубку и измѣримъ объемъ воды. Окажется, что онъ увеличился почти на одну пятую первоначальнаго объема. Эта прибыль обусловливается, конечно, тѣмъ сгустившимся паромъ,

котораго скрытая теплота нагрѣла всю массу воды до 100°C ¹⁾.

169. Скрытую теплотою испаренія пользуются для разныхъ цѣлей, въ особенности для охлажденія и замораживанія.

Такъ вода, налитая въ неглазурованный глиняный сосудъ, поддерживается постоянно прохладною въ тепломъ сухомъ воздухѣ, вслѣдствіе испаренія воды съ поверхности сосуда. Нѣчто подобное достигается и со стекляннымъ сосудомъ, если обернуть его мокрымъ холстомъ и выставить на вѣтеръ. Въ нѣкоторыхъ мѣстностяхъ Индіи производятъ ледъ, выставляя воду на ночь въ плоскихъ неглазурованныхъ сосудахъ, помѣщаемыхъ на рисовой соломѣ. Можно, конечно, получить болѣе быстрое дѣйствіе, взявъ вмѣсто воды болѣе летучія жидкости, напр. обыкновенный эфиръ ²⁾. Нѣсколько капель эфира, вылитыя на шарикъ термометра, производятъ быстрое сокращеніе термометрической жидкости, тѣмъ большее, чѣмъ выше температура воздуха. Тою же причиною обусловлено охлажденіе воды, которую заставляютъ кипѣть при низкихъ температурахъ (уменьшая давленіе, какъ въ § 165, b). Этотъ приѣмъ былъ употребленъ Джономъ Лесли для приготовленія льда, причемъ для поглощенія паровъ по мѣрѣ ихъ образованія онъ примѣнялъ сухую овсяную муку или большую по-

¹⁾ Результатъ очень наглядный, если припомнить, что $\frac{1}{4}$ фунта воды при 100°C нагрѣла бы фунтъ воды, взятой при 0° , приблизительно лишь на 20° . Зам. р. перев.

²⁾ Этиловый эфиръ—совершенно неправильно называемый «сѣрнымъ эфиромъ».

верхность сѣрной кислоты. Приѣмъ Лесли съ различными видоизмѣненіями служить и до сихъ поръ основаніемъ нѣкоторыхъ изъ самыхъ удобныхъ хозяйственныхъ машинъ для приготовленія льда.

Кріофоръ (котораго начало будетъ объяснено при Даніелевомъ гигрометрѣ, § 172) представляетъ другой любопытный примѣръ того же самаго явленія.

Когда струя угольнаго ангидрида, сжиженнаго давленіемъ, выпускается въ воздухъ, внѣшніе слои ея тотчасъ испаряются, заимствуя потребную скрытую теплоту отъ внутреннихъ частей, вслѣдствіе чего послѣднія замерзаютъ, и твердый угольный ангидридъ можетъ быть собранъ въ подходящемъ сосудѣ въ видѣ снѣгообразной массы. Этимъ путемъ водородъ повидимому полученъ былъ въ видѣ порошка сѣро-стального цвѣта. Сюда же относится поразительный опытъ замораживанія воды въ раскаленной до-бѣла платиновой чашкѣ. Это легко производится примѣшиваніемъ къ водѣ жидкаго сѣрнистаго ангидрида, который быстро испаряется, не прикасаясь въ то же время къ горячей поверхности, ибо приходитъ въ такъ-называемое «сфероидальное состояніе» (§ 213). Опытъ не удастся, если чашка не нагрѣта достаточно сильно.

Фарадею удалось подобнымъ путемъ заморозить даже ртуть въ раскаленномъ до-бѣла сосудѣ. Для этого ртуть, налитая въ маленькую чашечку, помѣщалась въ смѣсь твердаго угольнаго ангидрида и эфира, находившуюся въ сфероидальномъ состояніи на днѣ сильно раскаленнаго платиноваго тигля.

170. Читатель легко пойметъ теперь, почему возможно (какъ упомянуто въ § 155) производить очень низкія температуры, помѣщая смѣсь твердаго угольнаго

ангидрида и эфира въ приѣмникъ, изъ котораго удаленъ воздухъ.

171. Мы должны теперь рассмотретьъ обратное явленіе, сгущеніе пара въ жидкость. Для настоящаго случая мы ограничимся замѣчаніями лишь по отношенію къ водѣ. Мы уже видѣли въ § 162, что если въ сосудѣ содержится одинъ только водяной паръ подъ давленіемъ, соотвѣтствующимъ температурѣ насыщенія, то при малѣйшемъ повышеніи внѣшняго давленія уже начинается переходъ пара въ жидкость. Можно, конечно, выразить то же самое въ другой формѣ, сказавъ, что сгущеніе начинается, лишь только температура пара упадетъ ниже той, какая въ таблицѣ Реньо, § 164, отвѣчаетъ наличному давленію пара. Опытъ показалъ, что давленіе воздуха или другого газа измѣняетъ явленіе въ томъ только смыслѣ, что болѣе или менѣе *замедляетъ* его. Поэтому, если мы выставимъ на воздухъ, содержащій водяные пары, твердое тѣло, которое охлаждено ниже температуры насыщенія, соотвѣтствующей давленію паровъ въ воздухѣ, то начнетъ сгущеніе пара въ томъ воздушномъ слое, который непосредственно прикасается къ твердому тѣлу, и оно покроется слоемъ *росы*. Этотъ слой будетъ утолщаться до тѣхъ поръ, пока вслѣдствіе скрытой теплоты, выделяемой сгущающимся паромъ, твердое тѣло не нагрѣется до температуры насыщенія, отвѣчающей давленію паровъ въ воздухѣ. Если температура твердаго тѣла ниже 0°C , то слой влаги замерзаетъ по мѣрѣ осажденія и является *инеемъ*.

Металлическій сосудъ съ охлаждающею смѣсью въ опытѣ Гона (§ 121) быстро покрывается слоемъ инея, какъ бы тепелъ ни былъ окружающій воздухъ, предпо-

лагая, что онъ содержитъ хотя умѣренное количество водяного пара.

172. Изъ сказаннаго въ послѣднемъ § тотчасъ видно что понимается подъ метеорологическимъ терминомъ *точка росы*. Это есть температура, при которой насыщенный водяной паръ имѣлъ бы то самое давление, какое имѣетъ въ рассматриваемое время паръ, содержащійся въ воздухѣ; эту точку, слѣдовательно, можно было бы найти прямо изъ таблицы Реньо (§ 164), если бы мы знали количество пара въ кубическомъ футѣ воздуха. Но обыкновенно поступаютъ обратно: опредѣляютъ точку росы непосредственно и затѣмъ уже пользуются ею для нахождения помощью таблицы Реньо количества водяныхъ паровъ, содержащихся въ воздухѣ въ то или другое время.

Гигрометръ Даниеля есть остроумный приборъ, посредствомъ котораго можно подвергнуть тѣло медленному охлажденію, такъ что можетъ быть измѣрена температура его въ тотъ самый моментъ, какъ роса только что начинаетъ осаждаться. Онъ состоитъ изъ стеклянной трубки съ шариками на обоихъ концахъ. Одинъ шарикъ сдѣланъ изъ чернаго стекла, чтобы на его поверхности тотчасъ были замѣтны малѣйшіе слѣды росы. Въ этотъ шарикъ вставленъ термометръ (котораго показанія видны чрезъ прозрачную стеклянную трубку, соединяющую оба шарика) и налито нѣкоторое количество эфира. Мастеръ, изготовляющій приборъ, кипятитъ эфиръ и запаиваетъ другой шарикъ, когда воздухъ изъ всего прибора изгнанъ эфирными парами (какъ въ § 165, в). При употребленіи аппарата капаютъ эфиромъ на кусокъ кисей, обернутой вокругъ второго шарика. Испареніе эфира охлаждаетъ шарикъ и сгущаетъ эфирные

пары внутри него. Тогда въ черномъ шарикѣ образуется новое количество паровъ эфира, которые опять стущаются въ другой шарикѣ. Такимъ образомъ происходитъ настоящая перегонка изъ одного шарика въ другой, и черный шарикъ вмѣстѣ съ его содержимымъ постепенно охлаждается, вслѣдствіе поглощенія теплоты, идущей на постоянное образованіе пара. Температура термометра, вставленнаго въ черный шарикъ, отмѣчается въ самый моментъ перваго появленія росы. Температура отчитывается еще разъ въ моментъ исчезанія росы, когда аппарату представлено снова нагрѣваться теплотою окружающаго воздуха. Среднее изъ обоихъ отчетовъ обыкновенно принимаютъ за точку росы.

Положимъ, что въ аппаратъ налита вода вмѣсто эфира и что охлажденіе пустого шарика производится не эфиромъ, а смѣсью снѣга и соли. Быстрое испареніе части воды изъ наполненнаго шарика повлечетъ за собою замерзаніе остальной части. Таковъ криофоръ (§ 169).

Другой способъ опредѣленія точки росы основанъ на примѣненіи *влажнаго и сухого термометровъ* (психрометръ). Два сходныхъ термометра устанавливаются рядомъ; шарикъ одного изъ нихъ обернутъ кисеей, отъ которой нѣсколько нитей опускаются въ маленькій сосудъ съ водою, такъ что кисея постоянно поддерживается влажною. Термометръ съ непокрытымъ шарикомъ показываетъ температуру воздуха, другой—температуру болѣе низкую, которая отличается отъ первой вслѣдствіе постоянного испаренія воды съ влажной кисеи. Если воздухъ почти насыщенъ парами, то испареніе очень медленно, и пониженіе температуры мало. Но если воздухъ сухъ и въ особенности, если онъ въ то же время тепелъ, то испареніе быстро, и пониженіе температуры

значительно. Dr. Arjohn, изучавшій это явленіе особенно тщательно, даетъ слѣдующую формулу для опредѣленія точки росы по даннымъ описаннаго приспособленія:

$$p = p_0 - \frac{\delta}{48} \cdot \frac{b}{30}$$

Здѣсь δ есть разница между отчетами по обоимъ термометрамъ, p —искомое давленіе пара въ воздухѣ, p_0 —давленіе пара, отвѣчающее по таблицѣ Реньо температурѣ влажнаго шарика, а b есть высота барометра въ дюймахъ. Это до извѣстной степени еще эмпирическая формула. Полное теоретическое рѣшеніе вопроса предстоитъ найти въ будущемъ.

173. Первая правильная теорія образованія росы была дана въ *Essay* Уельса въ 1814 г. Она не можетъ быть изложена сполна прежде, чѣмъ мы рассмотримъ *лучеиспусканіе*. Достаточно сказать здѣсь, что охлажденіе камней, травы и т. п. посредствомъ излученія совершается быстрѣе всего въ ясныя и тихія ночи. Облака вообще отражаютъ обратно значительную часть теплоты, получаемой ими съ земной поверхности, и такимъ образомъ препятствуютъ почвѣ охладиться въ достаточной степени. Вѣтра со своей стороны, если только воздухъ не очень холоденъ, постоянно согрѣваютъ тѣла, охладившіяся путемъ излученія. Поэтому роса бываетъ очень обильна обыкновенно послѣ ясныхъ, тихихъ ночей; и если излученіе было достаточно быстро, то она является въ формѣ инея. Температура же самаго воздуха никогда не можетъ упасть много ниже точки росы, ибо какъ только это случится, такъ начнется сгущеніе пара и освобожденіе скрытой теплоты.

174. Сказанное въ предыдущихъ §§ о сгущеніи водя-

ного пара относится вообще до паровъ всѣхъ веществъ, которыя жидки при обыкновенныхъ температурахъ и давленіяхъ. Нѣкоторыя жидкости, какъ продажная сѣрная кислота, обладаютъ при обыкновенныхъ условіяхъ едва измѣримымъ давленіемъ пара; другія, какъ этиловый эфиръ, испаряются очень быстро.

Но лишь въ сравнительно недавнее время показано опытнымъ путемъ, что всѣ газы на дѣлѣ представляютъ пары. Это достигнуто превращеніемъ газовъ въ жидкое и иногда даже твердое состояніе. Для сгущенія однихъ достаточно одного охлажденія, другихъ — одного давленія; но нѣкоторые (въ особенности тѣ, которые обыкновенно называются *постоянными газами*) требуютъ совмѣстнаго дѣйствія холода и сжатія. Фарадей превратилъ въ жидкость многіе газы главнымъ образомъ помощью давленія. Съ другой стороны, Каньяръ Латуръ, нагревая жидкости подъ большимъ давленіемъ, превращалъ ихъ съ малымъ измѣненіемъ плотности въ газообразное состояніе (или, во всякомъ случаѣ, въ состояніе отличное отъ жидкаго). Однако Эндрьюсъ впервые разъяснилъ предметъ въ его цѣломъ, показавъ сущность различія между тѣмъ, что можетъ быть нынѣ названо истиннымъ газомъ, и тѣмъ, что можно назвать истиннымъ паромъ. Его опыты съ угольнымъ антидридомъ и другими тѣлами привели къ слѣдующему опытному закону:

Для всякаго паро- или газообразнаго вещества существуетъ нѣкоторая критическая точка; вещество только тогда можетъ быть превращено въ жидкость однимъ давленіемъ, какъ бы велико оно ни было, когда температура вещества ниже этой точки.

Критическая температура сѣрнистаго ангидрида вы-

сока, и это вещество легко сжижается при обыкновенных температурах давленіемъ одной или двухъ атмосферъ. Критическая точка угольнаго ангидрида лежитъ при $30^{\circ},9\text{ C}$, и онъ требуетъ для сгущенія при обыкновенныхъ температурахъ сорока или пятидесяти атмосферъ давленія. Водяной паръ нужно нагрѣть приблизительно до 412° C , чтобы онъ пересталъ сгущаться дѣйствіемъ давленія. Съ другой стороны, критическая температура для водорода, кислорода, азота и окиси углерода такъ низка, что превратить ихъ въ жидкость удалось лишь послѣ того, какъ примѣнено было совместное дѣйствіе значительнаго давленія и самыхъ сильныхъ охлаждающихъ смѣсей ¹⁾. Кайльте и Пикте, каждый отдѣльно, но одновременно, дали въ концѣ 1877 г. полное подтвержденіе закона Эндрьюса.

175. Если вещество находится при температурѣ, которая выше его критической точки, то мы можемъ назвать его истиннымъ газомъ; при температурѣ ниже этой точки—истиннымъ паромъ. Различіе ясно изъ слѣдующаго краткаго описанія опытовъ Эндрьюса надъ угольнымъ ангидридомъ.

При $13^{\circ},1\text{ C}$ углекислый газъ былъ сжатъ давленіемъ въ 49 атмосферъ — которое измѣрялось помощью воз-

¹⁾ Чтобы дать нѣкоторое понятіе объ этихъ низкихъ температурахъ, приводимъ результаты Вроблевскаго:

Точка кипѣнія жидкаго кислорода	— 184° C .
” ” ” воздуха	— 192° „
” ” ” азота	— 194° „
” ” ” жидкой окиси углерода. —	198° „

(Температура кипѣнія жидкаго водорода—всеѣ числа относятся къ обыкновенному атмосферн. давленію—по Милляу лежить при -215 C . Замеч. р. перев.).

душнаго манометра—до $\frac{1}{81}$ его начальнаго объема безъ какого-либо измѣненія въ состоянїи. При легкомъ повышенїи давленія начиналось сжиженіе, и объемъ угольнаго ангидрида въ жидкомъ состоянїи составлялъ $\frac{1}{463}$ начальнаго объема газа. Во время сжиженія и жидкость, и газъ были видимы въ трубкѣ, въ которой производился опытъ. Послѣ полнаго сжиженія угольный ангидридъ продолжалъ замѣтно сжиматься, когда повышалось давленіе. Нѣчто подобное наблюдалось и при $21^{\circ},5$ C; но сжиженіе началось только тогда, когда давленіе достигло шестидесяти атмосферъ. При $31^{\circ},1$ C, т. е. на $0^{\circ},2$ выше критической точки, газъ относился къ давленію какъ и при низшихъ температурахъ, до тѣхъ поръ, пока давленіе не доведено было до семидесяти четырехъ атмосферъ; тогда дальнѣйшее повышеніе давленія производило быстрое, но отнюдь не внезапное уменьшеніе объема, которое не сопровождалось ни видимымъ сжиженіемъ, ни появленіемъ (въ какой-либо моментъ процесса) двухъ различныхъ состоянїй вещества въ трубкѣ, въ которой производился опытъ. Послѣ этого угольный ангидридъ, котораго объемъ теперь былъ сведень къ $\frac{1}{380}$ первоначальнаго, при повышенїи давленія продолжалъ нѣсколько сжиматься. При болѣе высокихъ температурахъ упомянутое быстрое сокращеніе объема дѣлалось менѣе явственнымъ и при 48° не могло быть болѣе наблюдаемо. [Этотъ вопросъ будетъ полнѣе разобранъ ниже, въ гл. XX].

176. Для образованія жидкости изъ обыкновеннаго пара необходимо присутствіе какого либо ядра; иначе паръ можетъ оставаться въ насыщенномъ или даже пересыщенномъ состоянїи, не сгущаясь. Это недавно показано Айткиномъ (Aitken), который приписываетъ обра-

зование облаковъ и тумана присутствію мельчайшихъ частичекъ пыли въ воздухѣ. Частички пыли, какъ показалъ опытъ, могутъ быть вполне задержаны пропусканіемъ воздуха чрезъ пробку изъ хлопчатой бумаги. Каждая частичка притягиваетъ часть пара; когда ихъ много, на долю каждой приходится мало пара, и происходитъ туманъ; когда же ихъ мало, каждая захватываетъ больше, и образуются облака или даже дождевыя капли. Чѣмъ меньше число ядеръ, тѣмъ большіхъ размѣровъ будутъ отдѣльныя дождевыя капли. Айткинъ заключаетъ изъ своихъ опытовъ, что если бы атмосфера была совершенно свободна отъ подобныхъ частичекъ, то не образовалось бы ни тумана, ни облаковъ и не выпадало бы дождя: воздухъ освобождался бы отъ избытка влаги только посредствомъ *прямого* осажденія ея на тѣла, съ которыми соприкасается.

177. *Содержаніе §§ 159—176.*—Испареніе. Законъ Дальтона. Давленіе насыщеннаго водяного пара при различныхъ температурахъ по даннымъ Реньо. Гипсометрическій термометръ. Полная теплота пара. Замораживаніе посредствомъ испаренія. Сжиженіе. Точка росы. Гигрометры. Различіе между газомъ и паромъ. «Критическая точка» Эндрьюса. Причина облаковъ и тумана.

ГЛАВА X.

Измѣненіе температуры. Удѣльная теплота.

178. См. §§ 45—48. Въ этихъ §§ мы говорили о постепенномъ возвышеніи температуры воды въ ея твердомъ, жидкомъ и газообразномъ состояніяхъ, когда она находится подъ вліяніемъ постояннаго притока теплоты, и самъ собою представляется вопросъ: какое количество теплоты требуется для повышенія температуры воды на каждый градусъ въ каждомъ изъ ея трехъ состояній? Другими словами, становится-ли вода легче нагрѣваемой или труднѣе нагрѣваемой, когда переходитъ изъ одного молекулярнаго состоянія въ другое? Далѣе, если фунту воды и фунту ртути, взятымъ при одной и той же температурѣ, сообщить одинаковыя количества теплоты, то одинаково-ли нагрѣются оба тѣла, и если нѣтъ, то какъ будутъ относиться другъ къ другу повышенія ихъ температуры?

179. Опытъ отвѣтилъ на эти и другіе подобные вопросы, показавъ, что тѣла рѣзко различаются между собою въ отношеніи названнаго теплого дѣйствія; отсюда слѣдующее опредѣленіе *удѣльной теплоты*, какъ нѣ-

котораго свойства каждаго отдѣльнаго вещества (взятаго при опредѣленныхъ условіяхъ):

Удѣльная теплота вещества, взятаго при какихъ-либо опредѣленныхъ условіяхъ, есть число единицъ теплоты, которое потребно въ этихъ условіяхъ для возвышенія температуры одного фунта даннаго вещества на 1° C.¹⁾

Выше мы опредѣлили единицу теплоты, какъ количество теплоты потребное для повышенія температуры одного фунта воды на 1° C; поэтому изъ опредѣленія ясно, что удѣльная теплота воды есть 1. Ниже будетъ показано (§ 184), что удѣльная теплота воды такъ медленно измѣняется съ температурою, что ее на дѣлѣ можно считать одинаковою при 0° C и 10° C, т. е. при 32° F и 50° F (см. § 55).—Выраженіе «удѣльная теплота» (Specific Heat) было впервые дано сторонниками теплородной теоріи; но оно и нынѣ употребляется въ наукѣ, подобно «скрытой теплотѣ», «центробѣжной силѣ» и т. д., какъ удобное и совершенно безвредное.

180. Существуетъ много приемовъ опытнаго опредѣленія удѣльной теплоты, но мы можемъ дать мѣсто не болѣе, какъ двумъ или тремъ, поскольку дѣло касается твердыхъ и жидкихъ тѣлъ при обыкновенныхъ давленіяхъ. Мы начинаемъ съ приема самаго удобопонятнаго, который уже давно былъ придуманъ Бلاكомъ.

Мы увидимъ, когда будемъ говорить о *лучеиспусканіи*, что количество теплоты, излучаемое поверхностью

¹⁾ Не слѣдуетъ забывать, что, основывая наше опредѣленіе тепловой единицы на килограммѣ вмѣсто фунта, должно какъ въ опредѣленіи удѣльной теплоты, такъ и во всѣхъ дальнѣйшихъ случаяхъ просто замѣнять фунтъ килограммомъ.

горячаго тѣла (поскольку мы разсматриваемъ самое тѣло) въ теченіе даннаго времени зависитъ только отъ *температуры и свойства поверхности*. Поэтому, если наполнять тонкостѣнный металлическій сосудъ послѣдовательно различными жидкостями, которыхъ температура во всѣхъ случаяхъ была бы выше (или ниже) температуры окружающихъ тѣлъ, то можно быть увѣреннымъ, что быстрота потери (или пріобрѣтенія) теплоты лучеиспусканіемъ будетъ одинакова при одной и той же температурѣ, каковы бы ни были содержащіяся въ сосудѣ вещества. Положимъ для простоты, что сосудъ заключаетъ ровно фунтъ горячей воды. Тогда, наблюдая показанія термометра, погруженнаго въ воду, мы будемъ знать, что съ каждымъ градусомъ паденія термометра вода потеряла одну единицу теплоты путемъ лучеиспусканія и тепловыхъ теченій въ окружающемъ воздухѣ. Замѣтимъ число секундъ, отвѣчающее паденію температуры термометра на каждый градусъ—и мы будемъ въ состояніи построить таблицу числа секундъ потребныхъ для того, чтобы поверхность сосуда теряла одну единицу теплоты путемъ излученія при каждой изъ послѣдательныхъ температуръ.

Теперь наполнимъ сосудъ другою горячею жидкостью, положимъ, ртутью. (Въ случаѣ ртути сосудъ долженъ быть желѣзный—по химическимъ причинамъ). Замѣтимъ опять время паденія термометра на каждый градусъ. Окажется, что температура падаетъ *быстрѣе*, чѣмъ когда въ сосудѣ находилась вода, хотя, вслѣдствіе большаго удѣльнаго вѣса ртути, въ сосудѣ содержится теперь въ 13,6 раза болѣе жидкости. Время охлажденія на данное число градусовъ составляетъ теперь менѣе половины того, какое требовалось, когда сосудъ содержалъ воду.

Отсюда мы заключаемъ, что удѣльная теплота воды слишкомъ въ 27,2 раза болѣе удѣльной теплоты ртути, ибо одно и то же измѣненіе температуры произведено въ фунтѣ воды и 13,6 фунтахъ ртути, между тѣмъ какъ вода потеряла слишкомъ вдвое болѣе теплоты, чѣмъ ртуть. Точное численное значеніе удѣльной теплоты ртути, найденное этимъ путемъ, составляетъ лишь около $\frac{1}{30}$.

181. Описанный тотчасъ приемъ подаетъ поводъ къ различнымъ возраженіямъ. Наиболѣе важныя изъ нихъ: 1) что содержимое сосуда, если только оно не перемѣшивается постоянно, не можетъ имѣть во всѣхъ мѣстахъ одну и ту же температуру; 2) что если горлышко сосуда не закрыто вполнью, то происходитъ немало-важная потеря теплоты вслѣдствіе испаренія—потеря весьма различной величины для различныхъ жидкостей при одной и той же температурѣ.

Но для приступающаго къ изученію опытной науки этотъ приемъ очень поучителенъ, особенно если пользоваться *графическимъ способомъ* вывода результатовъ. Мы воспользуемся настоящимъ случаемъ, чтобы дать общесъ понятіе объ этомъ чрезвычайно важномъ способѣ. Хотя по самому существу своему онъ не можетъ быть особенно точнымъ, но онъ всегда свободенъ отъ *грубыхъ* ошибокъ, вслѣдствіе чего является почти неизбѣжнымъ пособіемъ при числовыхъ выкладкахъ, въ которыхъ даже самыя опытные вычислители могутъ дѣлать важныя ошибки.

[Такъ, положимъ, что результаты наблюденій температуры, доставляемые отчетами по термометру чрезъ послѣдовательные промежутки времени, равные или неравные, нанесены на (механически разграфленную) бу-

магу, какъ на рис. 31, причемъ промежутки времени отложены горизонтально, а соотвѣтственныя температуры вертикально. Рисунокъ представляетъ въ очень уменьшенномъ масштабѣ подлинное графическое изображеніе части численныхъ данныхъ, полученныхъ въ дѣйстви-

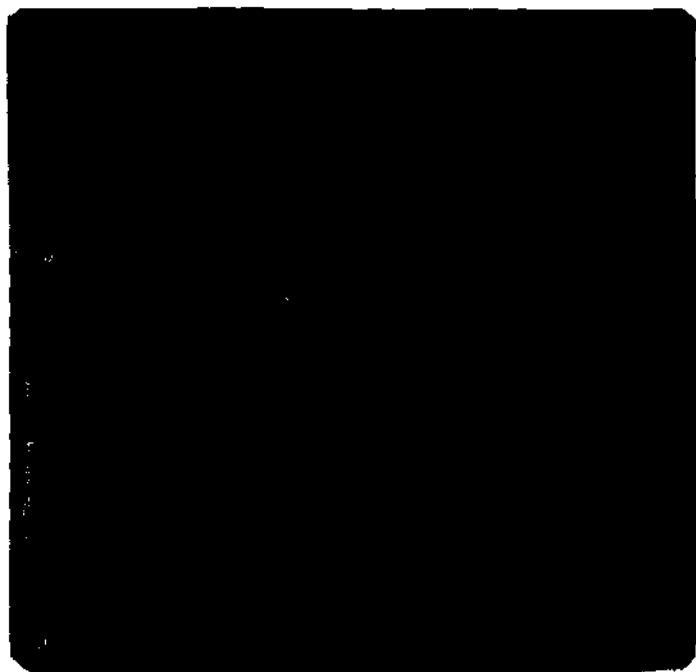


Рис. 31.

тельномъ опытѣ, именно охлажденіе мѣнянаго бруска при измѣреніи теплопроводности по способу Форбса (гл. XIV, § 242). Горизонтальная линія раздѣлена на минуты времени, вертикальная (на рисунокѣ слѣва) — на градусы Цельсія. Положимъ, что проведена *отъ руки* плавная кривая (она представлена сплошною чертой на

рисункѣ) такъ, чтобы она какъ можно совершеннѣе совпадала съ точками, отмѣченными при наблюденіи. Эта кривая представитъ тогда приближеніе (тѣмъ большее, чѣмъ меньше были промежутки между отдѣльными наблюденіями) къ той кривой, какая получилась бы приѣмомъ непрерывнаго фотографированія, § 136. Если затѣмъ требуется знать *быстроту охлажденія* при какой-либо температурѣ, положимъ, при 186° , то стоить только провести черезъ точку, соответствующую 186° на шкалѣ температуръ, горизонтальную линію и въ точкѣ встрѣчи съ кривою построить *касательную*, которую продолжить до пересѣченія съ обѣими раздѣленными линіями. Проведенная, какъ на рисунокѣ, касательная отсѣкаетъ на шкалѣ температуры 73° , а на шкалѣ времени 17,6 минутъ. Отсюда быстрота охлажденія при 186° составляетъ 73° въ 17,6 мин., или $4^{\circ},15$ въ минуту.

Наблюденіе показываетъ, что даже въ лучшихъ ртутныхъ термометрахъ, разъ столбикъ ртути повышается или падаетъ не *очень медленно*, передвиженіе происходитъ случайно внезапными скачками: поверхность ртутнаго мениска застрѣваетъ на мгновеніе въ трубкѣ и обуславливаетъ давленіе или напряженіе въ столбикѣ жидкости. Возможно также, что и возвращеніе шарика изъ расширеннаго состоянія къ прежнему объему происходитъ толчками. Поэтому для нахождения быстроты охлажденія, какъ въ предшествовавшемъ случаѣ, иногда бываетъ лучше производить наблюденія температуры чрезъ послѣдовательные равные промежутки времени, взятые за единицу, и наносить на бумагу *разности* послѣдовательныхъ отчетовъ, сдѣланныхъ въ срединѣ между началомъ и концомъ соответственнаго промежутка. Эти точки нанесены на рисунокѣ и соединены между собою

пунктирными линиями. Шкала времени та же, что и прежде; но градусы температуры въ десять разъ больше прежнихъ. Цифры градусовъ поставлены справа отъ шкалы температуръ. Мы видимъ, что теперь нельзя провести *плавную* кривую чрезъ разныя точки; но если мы проведемъ плавную кривую (пунктирная на рисункѣ) такъ, чтобы наблюденныя точки (быть можетъ, кривая не пройдетъ ни чрезъ одну изъ нихъ) въ общемъ одинаково уклонялись отъ нея и въ одну сторону, и въ другую—то *самыя ординаты* этой кривой представляютъ теперь соотвѣтственную быстроту охлажденія, и не будетъ надобности проводить касательныя. (На рисунокѣ ордината пунктирной кривой, соотвѣтствующая 186° , есть $4^{\circ},12$ —число согласное въ предѣлахъ одного процента съ результатомъ, полученнымъ по первому способу). Который изъ обоихъ способовъ долженъ быть предпочтенъ въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ—этому можетъ научить только опытъ].

182. Другой способъ опредѣленія удѣльной теплоты дается ледянымъ калориметромъ, въ которомъ количество теплоты, потерянное горячимъ тѣломъ при охлажденіи его до 0° C, измѣряется количествомъ расплавленного льда. Общее начало устройства такого калориметра ясно изъ рис. 32. Онъ состоитъ въ сущности изъ трехъ вложенныхъ другъ въ друга сосудовъ, изъ которыхъ два наружныя содержатъ ледъ и воду при обыкновенномъ атмосферномъ давленіи и, слѣдовательно, находятся постоянно при 0° C. Средній изъ трехъ сосудовъ можетъ передавать наружному теплоту только тогда, когда температура средняго сосуда измѣняется; но это можетъ случиться не иначе, какъ по расплавленіи всего содержащагося въ немъ льда (§ 142). Мы имѣемъ та-

кимъ образомъ очень простой и надежный способъ избѣжать потерю теплоты. Вещество, котораго удѣльную теплоту нужно измѣрить, взятое при опредѣленной температурѣ, вводится во внутренний сосудъ, и затѣмъ все плотно закрывается. Черезъ короткое время содержимое

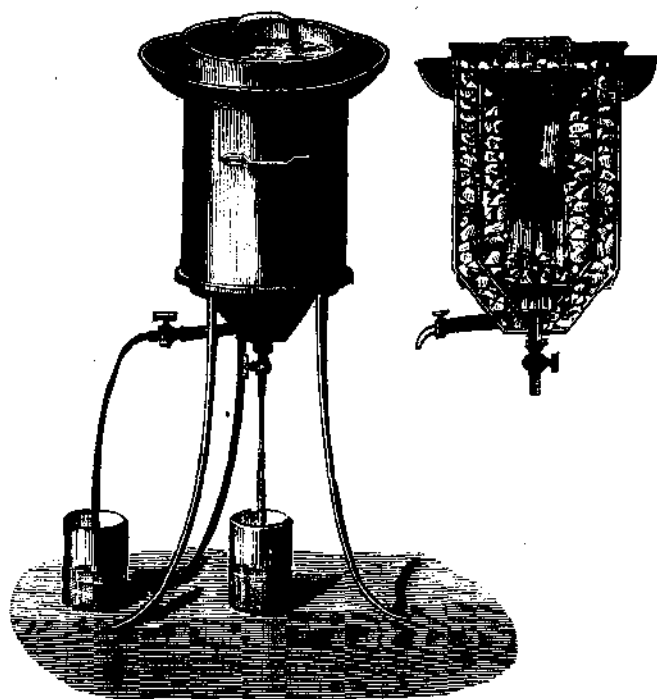


Рис. 32.

сосуда опять принимает температуру 0°C , но *отданная* веществомъ теплота расплавила часть льда въ среднемъ сосудѣ. Въ болѣе старой и грубой формѣ прибора, данной Лавуазье и Лапласомъ (рисунокъ сдѣланъ съ такого прибора), о количествѣ расплавленного льда

судили по количеству стекающей изъ средняго сосуда воды. Это, конечно, вело къ значительной ошибкѣ, такъ какъ часть воды непременно задерживалась дѣйствіемъ капиллярныхъ силъ. Въ усовершенствованной формѣ, предложенной Бунзеномъ и другими, средній сосудъ прибора сначала весь *наполняется* плотнымъ льдомъ, и затѣмъ количество растаявшаго льда вычисляется изъ *уменьшенія объема* (§ 145) *содержимаго*—уменьшенія, которое показывается во внѣшней трубкѣ ртутью, прикасающеюся ко льду.

Результатъ каждаго изъ подобныхъ опытовъ даетъ (§ 151) число единицъ теплоты, потерянныхъ извѣстною массою вещества при переходѣ отъ опредѣленной температуры къ 0°C. Раздѣляя число потерянныхъ единицъ тепла на число фунтовъ, содержащихся въ веществѣ, и на число градусовъ въ измѣненіи температуры, мы получаемъ *среднюю удѣльную теплоту* вещества во взятомъ промежуткѣ температуръ.

Этотъ способъ очень хлопотливъ, требуетъ большого тщанія и умѣнія; но при надлежащемъ выполненіи онъ надежнѣе всякаго другого.

183. Мы опишемъ еще лишь одинъ способъ, такъ называемый *способъ смѣшенія*. Въ немъ удѣльную теплоту вещества опредѣляютъ, погружая тѣло въ нагрѣтомъ состояніи въ жидкость (обыкновенно воду) болѣе низкой температуры и наблюдая температуру, которую принимаетъ смѣсь. Для грубыхъ опредѣленій этотъ приѣмъ достаточенъ, будучи къ тому же очень легкимъ. Но поправки, которыя безусловно необходимы, если мы желаемъ получить точные результаты, чрезвычайно хлопотливы и требуютъ большого опытнаго искусства. Эти поправки требуются главнѣйше вслѣдствіе потери тепла

излученіемъ и испареніемъ, отъ которыхъ свободенъ способъ, описанный выше.

Положимъ, что M фунтовъ какого-либо вещества при температурѣ $T^{\circ}\text{C}$ были смѣшаны съ m фунтами другого вещества при болѣе низкой температурѣ $t^{\circ}\text{C}$., и пусть смѣсь (послѣ всѣхъ поправокъ) имѣла температуру $\tau^{\circ}\text{C}$., которая, очевидно, будетъ лежать между T и t . *Теплота, потерянная однимъ веществомъ, перешла къ другому.* Но если удѣльныя теплоты обоихъ веществъ будутъ S и s , то потеря теплоты первымъ изъ нихъ (въ единицахъ теплоты) изобразится произведеніемъ

$$MS (T - \tau),$$

а количество теплоты, прибрѣтенное другимъ (въ тѣхъ же единицахъ)

$$ms (\tau - t).$$

Приравнивая одно другому, мы прямо получаемъ

$$\frac{S}{M} = \frac{m (\tau - t)}{M (T - \tau)},$$

т. е. находимъ *отношеніе* удѣльныхъ теплотъ, или, если второе вещество была вода—удѣльную теплоту первого вещества. [Должно замѣтить, что S есть средняя удѣльная теплота тѣла M между T и τ , а s —тѣла m между τ и t].

Обратимъ вниманіе на то, что температура смѣси, если не было потери теплоты путемъ излученія или испаренія, равняется

$$\tau = \frac{MST + mst}{MS + ms}.$$

Въ этомъ выраженіи мы встрѣчаемъ количества MS , ms . Каждое такое произведеніе изображаетъ собою число

фунтовъ воды, которое испытало бы то же самое температурное измѣненіе, какъ данная масса взятаго вещества отъ одного и того же числа единицъ теплоты. Составить произведеніе MS для даннаго тѣла значить «привести его къ водѣ» ¹⁾.

[Мы видимъ, что температура смѣси выражается въ функціи теплоемкостей и температуръ смѣшиваемыхъ тѣлъ точно такою же формулою, какою дается положеніе центра инерціи нѣкотораго числа матеріальныхъ частицъ, расположенныхъ на одной прямой, въ функціи ихъ массъ и положеній].

184. Мы приведемъ теперь нѣсколько общихъ данныхъ относительно удѣльных теплотъ твердыхъ тѣлъ и жидкостей. Но прежде слѣдуетъ замѣтить, что удѣльная теплота вообще увеличивается съ повышеніемъ температуры, и что (какъ упомянуто выше) наши опыты

¹⁾ Количество MS называется по-англійски „Water-equivalent“, по нѣмецки „Wasserwerth“ (по-русски это значило бы „водяной эквивалентъ“). Численно оно есть не что иное, какъ *теплоемкость тѣла*, т. е. число единицъ теплоты, необходимое для нагрѣванія всей массы (вѣса) тѣла на 1° (при опредѣленныхъ условіяхъ). Въ самомъ дѣлѣ, теплоемкость даннаго тѣла, раздѣленная на его массу M , даетъ *теплоемкость единицы массы тѣла*, а это и есть его удѣльная теплота, S . Ниже мы будемъ обыкновенно передавать выраженіе „Water-equivalent“, за неимѣніемъ подходящаго краткаго выраженія на русскомъ языкѣ, словомъ «теплоемкость».

Авторомъ упоминается и выраженіе *thermal capacity* (теплоемкость), какъ „иногда употребляемое“; но онъ подъ нимъ разумѣетъ теплоемкость *единицы объема*, которая численно выражается произведеніемъ удѣльной теплоты на плотность (вѣсъ единицы объема) тѣла. Въ этомъ смыслѣ *thermal capacity* употребляется напр. въ главѣ о проводимости теплоты (XIV)

Зам. р. перев.

опредѣленія даютъ намъ непосредственно только *среднюю удѣльную теплоту* вещества въ опредѣленномъ промежуткѣ температуръ. Изъ результатовъ такихъ опредѣленій, если послѣднія достаточно многочисленны и произведены при достаточно разнообразныхъ условіяхъ, уже не трудно вывести истинную удѣльную теплоту въ зависимости отъ температуры.

По Ренью фунтъ воды при 0°C требуетъ 100,5 единицъ теплоты для нагреванія до 100°C и 203,2 единицъ для нагреванія до 200°C.

Это изображается формулой

$$H = t + 0,00002t^2 + 0,0000003t^3,$$

которая приводитъ къ слѣдующему выраженію ¹⁾ для удѣльной теплоты воды при какой-либо температурѣ t°C:

$$1 + 0,00004t + 0,0000009t^2.$$

Такимъ образомъ измѣненіе въ обыкновенныхъ предѣлахъ температуры чрезвычайно мало. См. § 61.

Удѣльная теплота льда при 0°C составляетъ почти точно *половину* удѣльной теплоты воды. Ренью показали, что она уменьшается съ пониженіемъ температуры.

Удѣльная теплота стекла круглымъ счетомъ составляетъ около 0,2. Удѣльная теплота платины равняется 0,0355 и очень медленно измѣняется даже въ широкихъ границахъ температуры. Для другихъ металловъ, какъ мѣдь, приращеніе удѣльной теплоты составляетъ приблизительно 10 процентовъ на 100°C. Оно повидимому еще

¹⁾ Оно получается изъ перваго, если взять производную $\left(\frac{dH}{dt}\right)$ количества теплоты по температурѣ. См. аналогичный случай въ § 121 (выноска).

Зам. русск. перевод.

быстрѣ въ желѣзѣ. Но мы не имѣемъ еще достаточно точныхъ свѣдѣній по этому предмету, такъ какъ различные образцы приводятъ къ различнымъ результатамъ.

Удельныя теплоты элементарныхъ твердыхъ тѣлъ.

Свинецъ . . .	0,031	207	6,5
Олово . . .	0,056	118	6,6
Мѣдь . . .	0,095	63,5	6,0
Желѣзо. . .	0,114	56	6,4
Натрій . . .	0,293	23	6,7
Литій . . .	0,941	7	6,6

Первый столбецъ даетъ удѣльную теплоту при обыкновенныхъ температурахъ, второй—*атомный весъ* вещества. Числа третьяго столбца представляютъ произведенія чиселъ перваго и втораго. Мы видимъ, что эти произведенія въ предѣлахъ 10 процентовъ между собою тождественны. Отсюда заключаютъ, что *удѣльная теплота элементарныхъ твердыхъ веществъ обратно пропорціональна ихъ атомному весу*. Небольшія разницы между числами послѣдняго столбца приписываются (по крайней мѣрѣ отчасти) тому извѣстному факту, что удѣльная теплота каждаго вещества возрастаетъ съ температурою, а такъ какъ удѣльная теплота названныхъ веществъ опредѣлена при одной и той же температурѣ то сравниваемыя тѣла находятся въ различныхъ физическихъ состояніяхъ: одни изъ нихъ гораздо ближе къ точкѣ плавленія, нежели другія.

Приведенный опытный фактъ, по всей вѣроятности, доставить намъ очень важныя указанія относительно природы матеріи. Его значеніе, быть можетъ, сдѣлается очевиднѣе, если выразить его (см. примѣч. къ § 183) въ слѣдующей формѣ:

Атомныя теплоемкости всѣхъ твердыхъ элементарныхъ веществъ почти одинаковы.

Подобный же законъ найденъ для группъ сложныхъ тѣлъ *сходственнаго атомическаго состава*. Но произведеніе изъ удѣльной теплоты на молекулярный вѣсъ вообще измѣняется отъ одной группы къ другой.

185. Удѣльная теплота вещества въ жидкомъ состояніи, какъ мы видѣли, вообще больше, нежели въ твердомъ.

Удѣльныя теплоты элементарныхъ жидкостей.

Свинецъ . . .	0,040 . . .	400°С
Олово . . .	0,064 . . .	300°
Ртуть . . .	0,033 . . .	30°.

Второй столбецъ содержитъ среднюю температуру того промежутка, въ которомъ была опредѣлена удѣльная теплота.

Удѣльная теплота спирта—это важно запомнить—немного больше 0,6 (при 30°С).

186. Въ случаѣ газовъ задача опредѣленія удѣльной теплоты не только труднѣе въ экспериментальномъ отношеніи, чѣмъ въ случаѣ твердыхъ и жидкихъ тѣлъ, но она сложнѣе и съ теоретической точки зрѣнія. Ибо вслѣдствіе большой расширяемости газовъ приходится обозначать условія, при которыхъ измѣреніе должно быть произведено. Такъ, газъ во всемъ взятомъ промежуткѣ температуръ можетъ быть удерживаемъ или *при одномъ и томъ же объемѣ*, или *при одномъ и томъ же давленіи*. Мы говоримъ поэтому или объ *удѣльной теплотѣ при постоянномъ объемѣ*, или объ *удѣльной теплотѣ при постоянномъ давленіи*. Термодинамика даетъ намъ простое отношеніе между этими величинами для

совершеннаго газа (§ 126); и слѣдовательно, для такихъ газовъ, какъ водородъ, воздухъ и др., достаточно непосредственнаго опредѣленія только одной изъ двухъ удѣльныхъ теплотъ. Это обстоятельство является очень кстати, потому что опредѣленіе удѣльной теплоты при постоянномъ объемѣ представляетъ чрезвычайныя трудности. Масса газа при обыкновенныхъ давленіяхъ мала сравнительно съ массою сосуда—если только не придавать послѣднему неуклюжихъ размѣровъ; и мы не можемъ побѣдить этого затрудненія сжатіемъ газа, ибо тогда мы должны были бы сдѣлать сосудъ соотвѣтственно болѣе крѣпкимъ и, слѣдовательно, болѣе массивнымъ.

Для измѣренія удѣльной теплоты газа подъ постояннымъ давленіемъ пропускаютъ газъ равномерной струею чрезъ двѣ послѣдовательныхъ спиральныхъ трубки (змѣевика). Въ первой газъ нагревается до опредѣленной температуры, а во второй, погруженной въ калориметръ, газъ отдаетъ теплоту опредѣленной массѣ воды. Изъ объема газа, прошедшаго чрезъ змѣевики, мы можемъ вычислить его вѣсъ, а наблюденное повышеніе температуры воды въ калориметрѣ доставляетъ остальные необходимыя данныя.

Приемъ былъ предложенъ Деларошемъ и Бераромъ, но въ подробностяхъ очень усовершенствованъ Реньо.

Дальнѣйшія замѣчанія по этому предмету, въ особенности съ теоретической точки зрѣнія, должны быть пока отложены.

187. Опыты Реньо показали, что для такихъ газовъ, какъ воздухъ, теплостойкость данной массы газа не зависитъ отъ температуры и давленія и, слѣдовательно (§ 124), отъ объема.

Поэтому теплоемкость данного объема такого газа изменяется въ прямомъ отношеніи къ его плотности.

Одинаковые объемы различныхъ газовъ этой группы при одномъ и томъ же давленіи имѣютъ приблизительно равныя теплоемкости.

Удѣльныя теплоты газовъ ¹⁾ при постоянномъ давленіи.

Воздухъ . . . 0,237 Кислородъ . . 0,217

Азотъ 0,244 Водородъ . . 3,409

Эти числа, какъ мы можемъ видѣть, почти точно обратно пропорціональны плотностямъ разныхъ газовъ (см. § 184).

Звуковые опыты показали, что отношеніе обѣихъ удѣльныхъ теплотъ для подобныхъ газовъ—около 1,408, откуда удѣльная теплота воздуха при постоянномъ объемѣ выходитъ равною 0,168.

Удѣльная теплота водяного пара при томъ же условіи равняется 0,48—немного менѣе удѣльной теплоты льда (§ 184). Такимъ образомъ вода имѣетъ въ жидкомъ состояніи вдвое большую удѣльную теплоту, чѣмъ въ твердомъ или парообразномъ.

188. *Содержаніе* §§ 178—187.—Измѣненіе температуры единицы массы отъ данного количества теплоты. Удѣльная теплота. Методъ охлажденія. [Отступленіе: о графическомъ способѣ]. Ледяной калориметръ. Способъ смѣшенія. Приведеніе къ водѣ; теплоемкость. Соотношеніе между удѣльною теплотою и атомнымъ вѣсомъ. Удѣльная теплота газовъ: а) при постоянномъ объемѣ, б) при постоянномъ давленіи. Удѣльная теплота водяного пара.

¹⁾ Теплоемкости единицы вѣса.

ГЛАВА XI.

Термоэлектричество.

189. Въ § 49 мы уже изложили основное явленіе термоэлектричества, въ томъ видѣ, какъ оно было открыто Зеебекомъ; теперь мы ближе рассмотримъ предметъ съ опытной стороны. Для этого намъ понадобится выраженіе *электродвигательная сила* ¹⁾. О ея свойствахъ достаточно будетъ сказать слѣдующее:

Напряженность тока въ данной цѣпи прямо пропорціональна электродвигательной силѣ и обратно пропорціональна сопротивленію. Энергія тока есть произведеніе электродвигательной силы (или, сокращенно, э. д. с.) на напряженность тока.

Мы начнемъ съ того, что приведемъ слѣдующій опытный результатъ:

Положимъ, что въ термоэлектрической цѣпи, когда температуры ея спаевъ t_0 и t_1 , э. д. с. есть e , а когда температуры спаевъ t_1 и t_2 , э. д. с. есть e' ; если затѣмъ температуры спаевъ будутъ t_0 и t_2 , то э. д. с. будетъ $e + e'$.

¹⁾ Electro-motive Force. У насъ также «электровозбудительная сила».

[Разсмотримъ это въ примѣненіи къ цѣпи изъ *четы-
рехъ* проволокъ, сдѣланной попеременно изъ двухъ ме-
талловъ, напр. желѣза и мѣди (рис. 33).

Въ § 49 уже указано, что проволоки могутъ быть
спаяны въ мѣстахъ ихъ соединенія. Ибо третье веще-
ство, напр. металлъ или припой, включенное въ цѣпь,
не вліяетъ на результатъ, если оно имѣетъ одинаковыя
температуры въ точкахъ соединенія съ каждымъ изъ
двухъ взятыхъ металловъ.

Пусть температуры четырехъ спаевъ будутъ тѣ, ка-
кіи обозначены на чертежѣ. Спай *D* и *A* вмѣстѣ (если

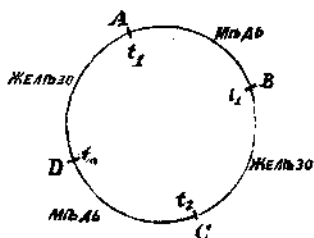


Рис. 33.

бы *B* и *C* имѣли одинаковую температуру) дали бы
э. д. с. равную e , а *B* и *C* вмѣстѣ (если бы *D* и *A*
имѣли одну общую температуру) произвели бы э. д. с.
равную e' . При томъ расположеніи, какое дано чертежу,
э. д. с. будетъ $e + e'$, если отбросить сдѣланныя выше
(въ скобкахъ) предположенія.

Но электродвигательную силу нашей цѣпи можно
разсматривать какъ происходящую только отъ разности
температуръ спаевъ *C* и *D*, ибо температуры спаевъ
A и *B* одинаковы и, слѣдовательно, мѣдная проволока
AB не оказываетъ дѣйствія. Поэтому та доля вліянія,

которую вносить каждый металл въ э. д. с. такой цѣпи. зависить только отъ температуръ его концовъ, т. е. не зависить отъ температуры остальной части цѣпи].

190. Изъ приведеннаго выше опытнаго факта слѣдуетъ, что если мы раздѣлимъ какой-либо промежутокъ температуръ, отъ t_0 до t_n , на части, а именно, отъ t_0 до t_1 , отъ t_1 до $t_2, \dots$ и отъ t_{n-1} до t_n , то въ простой цѣпи изъ двухъ металловъ, въ которой температуры спаевъ суть t_0 и t_n , э. д. с. равняется суммѣ отдѣльныхъ значеній, которыя она имѣла-бы, если-бы температуры спаевъ послѣдовательно были t_0 и t_1 , t_1 и $t_2, \dots$ t_{n-1} и t_n .

Теперь примемъ эти послѣдовательные промежутки температуръ за равные и сдѣлаемъ слѣдующее опредѣленіе *термоэлектрической способности*: термоэлектрическая способность цѣпи изъ двухъ металловъ при температурѣ t есть э. д. с. этой цѣпи, когда температура одного изъ спаевъ на полградуса выше, а другого на полградуса ниже t .

Мы получаемъ такимъ образомъ возможность изображать діаграммою относительныя термоэлектрическія положенія какихъ-либо двухъ металловъ при разныхъ температурахъ. Для этого мы строимъ на линіи, отвѣчающей одному изъ металловъ, маленькіе прямоугольники. ширина которыхъ соотвѣтствовала бы одному градусу (см. рис. 34).

Площадь каждаго изъ прямоугольниковъ представляетъ термоэлектрическую способность при температурѣ, соотвѣтствующей срединѣ его основанія; и очевидно, что если мы возьмемъ промежутки температуръ достаточно малыми, то верхняя граница прямоугольниковъ сдѣлается сплошною линіей. Эта линія дастъ намъ

въ каждой точкѣ термоэлектрическое положеніе второго металла по отношенію къ первому, такъ какъ первому отвѣчаетъ та линія, на которой отложены температуры. Сумма же площадей любого числа прямоугольниковъ (дающая э. д. с. для двухъ данныхъ температуръ спаевъ) изображается теперь площадью соответственной части кривой.

191. Но есть другой опытный результатъ, болѣе общій, нежели приведенный въ § 189. *При каждой температурѣ алгебраическая сумма термоэлектрическихъ*

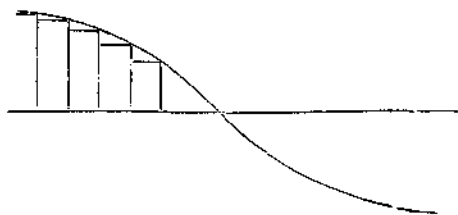


Рис. 34.

способностей металловъ α и β и металловъ β и γ равна термоэлектрической способности металловъ α и γ .

[Положимъ, что одна изъ желѣзныхъ проволокъ на чертежѣ § 189 замѣнена третьимъ металломъ, напр. золотомъ, и пусть температуры концовъ одной мѣдной проволоки будутъ t_0 , а другой t_1 (рис. 35). Тогда A и D (если-бы B и C имѣли одинаковую температуру) произвели-бы э. д. с., зависящую только отъ желѣзно-мѣдной пары при температурахъ t_0 и t_1 ; B и C (если бы A и D имѣли одинаковую температуру) произвели бы э. д. с., зависящую только отъ мѣдно-золотой пары при тѣхъ же самыхъ температурахъ спаевъ. Легко видѣть,

какъ прежде, что приведенный выше опытный результатъ дѣлаетъ наши предположенія (въ скобкахъ) излишними. Ибо такъ какъ концы каждой мѣдной проволоки имѣютъ одинаковыя температуры, вся цѣпь дѣйствуетъ какъ желѣзно-золотая пара, температуры спаевъ которой суть t_0 и t_1 .]

Такимъ образомъ, если помощью приѣма § 190 мы построимъ линіи, изображающія термоэлектрическія положенія желѣза и золота по отношенію къ мѣди, выбранной за норму, то проведенныя линіи дадутъ поло-

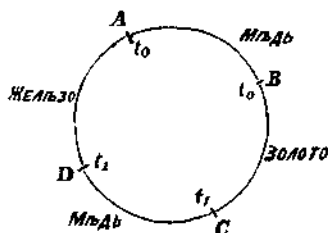


Рис. 35.

женіе желѣза и золота по отношенію другъ къ другу. Отсюда возможность построенія *термоэлектрической диаграммы*, содержащей по одной линіи для каждого металла. Мысль подобнаго способа изображенія была подана В. Томсономъ въ 1855 году, и онъ же далъ грубую предварительную схему. Диаграмма, представляющая «первое приближеніе» къ точной, была дана Тэтомъ въ 1873 г. Эта диаграмма представлена въ маломъ масштабѣ въ § 198; но она можетъ быть вполне объяснена лишь послѣ того, какъ мы приведемъ нѣсколько добавочныхъ опытныхъ фактовъ. Мы тогда увидимъ, что построенная надлежащимъ образомъ термоэлектрическая

діаграмма воплощаетъ въ себѣ все, что намъ извѣстно о термоэлектричествѣ. Такимъ образомъ помощью діаграммы мы можемъ нынѣ представлять предметъ въ гораздо болѣе простой и сжатой формѣ, чѣмъ это было возможно прежде.

192. Электрическій токъ въ термоэлектрической цѣпи представляетъ опредѣленное (вообще весьма малое) количество энергіи, измѣряемое, какъ упомянуто выше, произведеніемъ эл.-двигательной силы на напряженность тока. Источникомъ этой энергіи можетъ быть только теплота, сообщенная (см. § 49) части цѣпи. И существованіе тока обуславливаетъ то, что цѣпь въ общемъ расходуетъ теплоту.

Въ исторіи науки весьма замѣчательно, что Пельтье, (1834) безъ всякаго пособія со стороны теоріи энергіи сдѣлалъ слѣдующее опытное открытіе:

Если электрическій токъ отъ какого-нибудь вѣшняго источника проходитъ чрезъ мѣсто соединенія двухъ металловъ, то онъ причиняетъ въ этомъ мѣстѣ или поглощеніе, или выдѣленіе теплоты.

Если токъ имѣетъ то самое направленіе, какое имѣлъ бы термоэлектрическій токъ, возбуждаемый нагрѣваніемъ спая, то происходитъ поглощеніе теплоты—и наоборотъ.

Эти явленія легко провѣрить съ помощью гальванометра. Двѣ проволоки (напр. желѣзная и мѣдная) свариваются въ одномъ только мѣстѣ по срединѣ; одинъ изъ концовъ желѣзной проволоки соединяется съ однимъ полюсомъ гальваническаго элемента, другой—съ однимъ изъ концовъ обмотки гальванометра. Мѣдная проволока расположена такъ, что при наклоненіи ея въ одну сторону мы замыкаемъ токъ элемента, оставляя цѣпь галь-

ванометра открытою, а при наклоненіи въ другую сторону прерываемъ токъ элемента и замыкаемъ цѣпь гальванометра: такимъ образомъ мѣсто соединенія желѣза и мѣди будетъ попеременно находиться то въ одной цѣпи, то въ другой. Гальванометръ всегда покажетъ отклоненіе послѣ того, какъ электрическій токъ былъ пропущенъ чрезъ мѣсто соединенія. Отклоненіе мѣняетъ знакъ, если направленіе тока будетъ обращено.

Для этого опыта должно брать толстыя проволоки, такъ какъ иначе нагреваніе, происходящее вслѣдствіе обыкновеннаго сопротивленія ихъ току отъ элемента, можетъ быть больше, чѣмъ явленіе Пельтье, которое хотятъ наблюдать.

При надлежащихъ предосторожностяхъ такого рода можно вызвать появленіе или поглощеніе значительнаго количества теплоты. Ленцу удалось въ 1838 г. заморозить немного воды посредствомъ пропусканія электрическаго тока въ надлежащемъ направленіи чрезъ мѣсто соединенія висмута и сурьмы, причемъ самые металлы были помѣщены въ тающій снѣгъ.

Прямое количественное измѣреніе явленія Пельтье при *разныхъ температурахъ* представляетъ очень большія экспериментальныя трудности. Онѣ до сихъ поръ превзойдены лишь отчасти, главнымъ образомъ опытами Наккари (Naccari) и Беллати (Bellati). Результаты согласуются, поскольку того можно ожидать, съ приводимыми ниже.

Впрочемъ, нельзя сомнѣваться, что для любой пары металловъ, взятыхъ при данной температурѣ, явленіе Пельтье прямо пропорціоноально напряженности употребленнаго тока.

193. Джоуль первый обратилъ вниманіе на то, что

явленіе Пельтье даетъ намъ ключъ къ объясненію энергіи термоэлектрическаго тока; и весьма вѣроятно, что *могутъ быть* такія пары металловъ (вѣроятно—сплавовъ), въ цѣпи которыхъ это явленіе есть *единственный* источникъ тока. [Мы увидимъ это ниже, въ § 199].

Но другое явленіе, замѣченное Кеммингомъ (Cumming) вскорѣ послѣ опубликованія открытія Зеебека, показываетъ, что явленіе Пельтье составляетъ вообще только часть энергіи тока. Открытіе Кемминга состоитъ въ слѣдующемъ:

Если въ цѣпи, составленной изъ нѣкоторыхъ паръ металловъ, каковы железо и мѣдь, железо и серебро, железо и золото и др., одинъ спай удерживать при обыкновенныхъ температурахъ, а температуру другого спая постоянно повышать, то эл.-двигательная сила возрастаетъ все болѣе и болѣе медленно, пока не достигнетъ maximum'a, послѣ котораго мало-по-малу падаетъ и наконецъ мѣняетъ знакъ.

В. Томсонъ объясняетъ это явленіе слѣдующимъ образомъ. При той температурѣ нагрѣтаго спая, при которой (въ опытѣ Кемминга) эл.-двигательная сила достигаетъ maximum'a, оба металла нейтральны по отношенію другъ къ другу, т. е. ихъ термоэлектрическая способность уничтожается, и вмѣстѣ съ тѣмъ *исчезаетъ явленіе Пельтье*. Это происходитъ, какъ показываетъ чертежъ § 190 (рис. 34), когда соотвѣтствующія обоимъ металламъ линіи взаимно пересѣкаются, ибо послѣ пересѣченія прямоугольники (изъ которыхъ составилъ чертежъ) принимаютъ обратное положеніе и, слѣдовательно, должны имѣть противоположный алгебраическій знакъ.

Томсонъ разсуждаетъ далѣе такъ. Предположимъ цѣпь изъ мѣди и желѣза, въ которой нагрѣтый спай находится при нейтральной температурѣ, а другой при нѣкоторой

низшей температурѣ: источникъ энергіи тока мы не можемъ искать въ теплотѣ нагрѣтаго спая, такъ такъ металлы, будучи въ этомъ мѣстѣ нейтральными по отношенію другъ къ другу, вовсе не должны показывать явленія Пельтье. Что же касается холоднаго спая, то онъ не охлаждается, а *нагрѣвается* токомъ. Итакъ, энергія можетъ взятыся только изъ самихъ проволокъ, изъ одной или изъ обѣихъ, и именно вслѣдствіе разницы температуръ ихъ концовъ.—Предположеніе, что явленіе Пельтье уничтожается при нейтральной температурѣ, требуетъ опытнаго подтвержденія, которое до сихъ поръ дано лишь отчасти. Мы упоминаемъ объ этомъ только съ цѣлью указать, что опытыны основы разсужденія не достаточно полны. Кэмпбелъ (Campbell, *Proc. R. S. E.* 1882) до нѣкоторой степени произвелъ *качественную* повѣрку, показавъ, что отношеніе между явленіями Пельтье при двухъ температурахъ согласуется съ тѣмъ, какое выходитъ изъ термоэлектрической діаграммы. Возможно, что его методъ дастъ средство установить опытнымъ путемъ фактъ исчезновенія явленія Пельтье при нейтральной температурѣ.

Такимъ образомъ Томсонъ былъ приведенъ къ заключенію, что

Электрическій токъ, проходя по неравномерно нагрѣтому проводнику, по крайней мѣрѣ въ случаѣ одного изъ двухъ металловъ, имѣющихъ нейтральную точку, долженъ производить поглощеніе или выдѣленіе теплоты, смотря по тому, идетъ ли онъ отъ теплыхъ частей къ холоднымъ, или наоборотъ.

Послѣ ряда тщательныхъ опытовъ (описанныхъ въ *Phil. Trans.* 1855) Томсонъ нашелъ, что

Электрическій токъ, проходя по неравномерно на-

грѣтому мѣдному проводнику, дѣйствуетъ подобно реальной жидкости, т. е. стремится уравнять разницы въ температурахъ. Въ желѣзѣ онъ стремится увеличить эти разницы.

Такъ, когда токъ проходитъ по мѣдной проволоцѣ отъ холоднаго мѣста къ теплomu, происходитъ поглощеніе теплоты—и наоборотъ. Въ желѣзѣ явленіе обратно. Это «явленіе Томсона» иногда называется *электрическимъ переносомъ теплоты* (Electric Convection of Heat).

194. Такимъ образомъ, Томсонъ говоритъ объ удѣльной теплотѣ положительнаго электричества въ металлѣ и считаетъ ее положительною въ мѣди и отрицательною въ желѣзѣ по причинѣ только что объясненнаго различія. Въмѣстѣ съ этими замѣчательными результатами Томсонъ далъ термодинамическую теорію термоэлектрическаго тока въ зависимости отъ явленія Пельтье и электрическаго переноса, но не указалъ точнаго выраженія для величины переноса или явленія Пельтье въ зависимости отъ температуры. Онъ говоритъ только, что линіи, отвѣчающія разнымъ металламъ въ термоэлектрической діаграммѣ, «вообще будутъ кривыми». Но онъ показалъ на опытѣ, что термоэлектрическій токъ въ цѣпи изъ двухъ металловъ исчезаетъ не только тогда, когда спай имѣютъ одинаковую температуру (какъ въ § 190), но и тогда, когда ихъ температуры равно отстоятъ отъ нейтральной точки. Если, слѣдовательно, одинъ изъ металловъ термоэлектрически представляется прямою линіею (какъ въ діаграммѣ § 190), то другому будетъ отвѣчать кривая, пересекающая первую въ нейтральной точкѣ и имѣющая *одинаковые форму и размеры* по обѣ противоположныя стороны отъ этой точки.

[Главное содержаніе остальной части этой главы взято изъ *Rede Lecture* 1873 *].

Измѣреніемъ э. д. с. многихъ паръ металловъ во всемъ промежуткѣ температуръ, указываемыхъ ртутнымъ термометромъ, найдено, что если термоэлектрическое положеніе какого-нибудь одного металла представить на діаграммѣ прямою линіей, то линіи для другихъ металловъ (вообще) также будутъ прямыми. Это не ведетъ къ другимъ предположеніямъ, кромѣ только что названныхъ. Поэтому, какимъ бы ни оказалось въ концѣ концовъ точное выраженіе для электрическаго переноса теплоты въ зависимости отъ температуры и, слѣдовательно, истинный видъ термоэлектрической діаграммы, мы можемъ утверждать, что если діаграмму деформировать (сдвигомъ) такъ, чтобы линія одного какого-либо металла стала прямою, то линіи большинства другихъ металловъ также сдѣлаются прямыми. Отсюда слѣдуетъ, что *быстрота измѣненія термоэлектрической способности двухъ металловъ съ температурою постоянна.*

195. Упомянутыя выше теоретическія понятія Томсона основаны на предположеніи, что въ цѣли нѣтъ другого обратимаго теплого дѣйствія, кромѣ явленій Пельтье и Томсона. Если это такъ, то изъ *теоріи* теплоты и только что приведенныхъ результатовъ (какъ будетъ показано въ XXI главѣ) слѣдуетъ, что величина явленія Пельтье пропорціональна термоэлектрической способности и абсолютной температурѣ. Точно также разность (алгебраическая) удѣльныхъ теплотъ электричества въ обоихъ металлахъ пропорціональна абсолютной температурѣ.

*) *Nature*, vol. VIII, pp. 86 и 122.

Поэтому, если есть металлъ, въ которомъ удѣльная теплота электричества при нѣкоторой температурѣ равна нулю, то теоретическій выводъ изъ приведенныхъ выше опытныхъ результатовъ (§ 194), будетъ:

Удѣльная теплота электричества въ металлѣ вообще прямо пропорціональна абсолютной температурѣ.

Леру (Le Roux) произвелъ въ 1867 году цѣнный рядъ прямыхъ измѣреній электрическаго переноса теплоты и показалъ, что онъ равенъ нулю или, по крайней мѣрѣ, чрезвычайно малъ въ свинцѣ.

196 Мы можемъ теперь объяснить указанія, даваемые термоэлектрической діаграммою, и примѣнить ее къ вычисленію явленій Пельтье и Томсона, вычисленію, которое вполнѣ показываетъ, откуда берется энергія термоэлектрическаго тока.

Пусть чертежъ (рис. 36) изображаетъ часть діаграммы, въ которой термоэлектрическое положеніе двухъ металловъ, напр. мѣди и желѣза, представлено прямыми линіями CC' и II' . Вертикальная ось OE соотвѣтствуетъ абсолютному нулю температуры. Проведемъ параллельно OE прямая, соотвѣтствующія (абсолютнымъ) температурамъ t и t' обоихъ спаевъ и пересѣкающія линіи обоихъ металловъ въ точкахъ C, I и C', I' . Для простоты положимъ, что обѣ эти температуры ниже нейтральной точки N . Тогда э. д. с. мѣдно-желѣзной цѣпи изобразится (§ 190) площадью $CC'PI$; токъ идетъ въ положительномъ направленіи, отъ мѣди къ желѣзу чрезъ болѣе нагрѣтый спай, что на чертежѣ и изображено стрѣлками. [Причина, почему линія для мѣди начерчена *повышающеюся* вправо, состоитъ въ томъ, что удѣльная теплота электричества въ мѣди положительна (§ 194)]. Площадь $CC'PI$ пред-

ставить намъ энергію проходящаго по цѣни тока единичнаго напряженія.

Но (по § 195) площадь $D' B' C' I'$ изображаетъ явленіе Пельтье (поглощеніе теплоты) въ нагрѣтомъ спаѣ при проходѣ чрезъ него единицы тока; а $D I C B$ —явленіе Пельтье (развитіе теплоты) въ холодномъ спаѣ при томъ же условіи. Слѣдовательно, площадь $B' B C C'$ представить при томъ же условіи явленіе Томсона въ мѣди, а

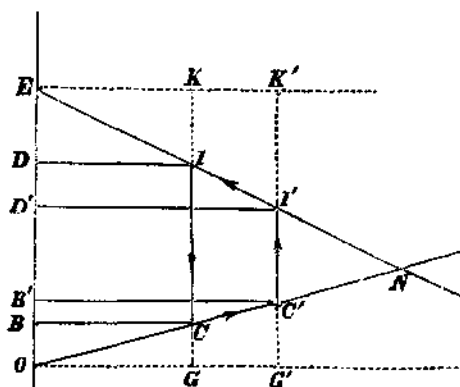


Рис. 36.

$D D' I' I$ —въ желѣзѣ. Обѣ площади обозначаютъ поглощеніе теплоты, ибо токъ идетъ отъ холоднаго мѣста къ теплomu въ мѣди и отъ теплаго къ холодному въ желѣзѣ. Легко показать (помощью элементарной геометріи), что $G C$ есть удѣльная теплота электричества въ мѣди при $t^{\circ} C$ (положительная), а $K I$ есть (отрицательная) удѣльная теплота электричества въ желѣзѣ.

Всю площадь $B C C' I' I D$ можно разсматривать, какъ изображающую количество энергіи, поглощенное

въ формѣ теплоты, а часть $D I C B$ представляетъ количество энергій, выдѣлившееся въ той же формѣ. Разность $C C' I I$ идетъ на произведеніе термоэлектрическаго тока. Итакъ, первый законъ термодинамики удовлетворенъ. Для того, чтобы отъ пропорціональности перейти къ *дѣйствительнымъ* величинамъ, слѣдуетъ еще умножить каждую площадь на напряженность тока, который въ дѣйствительности протекаетъ по цѣпи.

[Хорошимъ упражненіемъ для учащагося будетъ построеніе діаграммы, соотвѣтствующей тому случаю, когда одинъ или оба спая находятся при температурѣ выше нейтральной, и когда удѣльная теплота электричества въ обоихъ металахъ положительна. Полезно также будетъ разобрать случай цѣпи изъ трехъ металловъ, три спая которыхъ имѣютъ различныя температуры. Мы даемъ чертежъ для этого случая (см. рис. 37). Удѣльная теплота электричества въ A и B положительна, въ C отрицательна. Спай B, C находится при t_1^0 , спай C, A при t_2^0 , спай A, B при t_3^0 ; площадь, обведенная двойной линіей (частью положительная, частью отрицательная), изображаетъ собою в. д. с].

Чтобы показать приѣмнѣмость второго закона термодинамики, нужно доказать, что алгебраическая сумма всѣхъ отдѣльныхъ количествъ поглощенной и выдѣленной теплоты, раздѣленныхъ каждое на соотвѣтствующія абсолютныя температуры, равняется нулю. Но мы, очевидно, имѣемъ на нашемъ чертежѣ (рис. 36)

$$B'D' - BD + BB' + D'D = 0.$$

197. Разсмотримъ теперь, какъ должна измѣняться напряженность тока съ измѣненіемъ температуры спаевъ, если наши положенія справедливы. [См. рис. 36].

Другими словами, если CI дано, то какъ будетъ измѣняться площадь $CC'I'I$ при повышеніи температуры t' ?

Не вводя символовъ, легко отвѣтить на этотъ вопросъ слѣдующимъ образомъ. Пусть $C'I'$ изображаетъ скорость, а t' —время. Тогда площадь $CC'I'I$ представитъ пространство, пройденное во время $t'—t$. Но очевидно, что эта скорость равномерно уменьшается съ возрастаніемъ времени, т. е. что мы имѣемъ *постоянное ускореніе*, на-

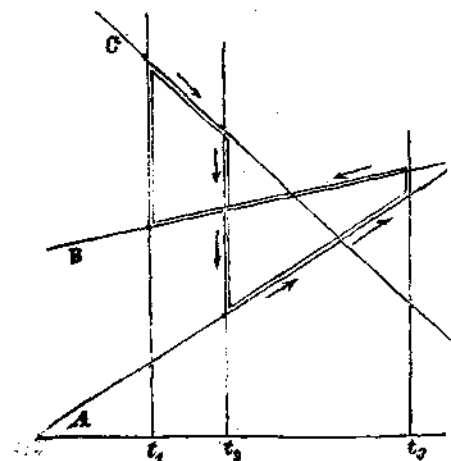


Рис. 37.

правленное вертикально внизъ, соединенное съ постоянною скоростью вправо—какъ разъ случай полета пушечнаго снаряда безъ сопротивленій движенію. Отсюда: если одинъ спай термоэлектрической цѣпи удерживается при постоянной температурѣ, а температура другого постепенно повышается, то кривая, изображающая напряженность тока въ зависимости отъ измѣняющейся температуры, будетъ парабола, которой ось параллельна оси

электродвигательныхъ силъ (оси ординатъ), а абсцисса вершины равняется температурѣ нейтральной точки.

Это найдено совершенно вѣрнымъ по отношенію къ большинству термоэлектрическихъ паръ; но не для всякихъ температуръ въ случаѣ, если одинъ изъ обоихъ металловъ будетъ желѣзо или никкель.

[Ошибочное объясненіе термоэлектрическихъ токовъ, быть можетъ, внушенное этимъ опытнымъ фактомъ, но основанное на предположеніи, что источникъ э. д. с. въ цѣпи изъ двухъ металловъ лежитъ исключительно въ спаяхъ, было дано Акин'омъ въ 1863 году *) и немного позже Авенаріусомъ **). Такъ какъ это объясненіе уже проникло въ нѣкоторые учебники, то необходимо обратить вниманіе читателя, что оно не можетъ быть вѣрно. Помимо другихъ недостатковъ, оно совершенно пренебрегаетъ существованіемъ Томсоновскаго явленія, участіе котораго вполнѣ доказано независимо разными наблюдателями].

198. Термоэлектрическая діаграмма на стр. 214 (взятая изъ *Trans. R. S. E.*, 1873) содержитъ линіи для нѣкоторыхъ обыкновенныхъ металловъ въ предѣлахъ температуры, измѣряемой помощью ртутныхъ термометровъ. Линіи висмута и сурьмы не могутъ быть въ ней представлены. Первая лежитъ далеко выше границъ діаграммы, вторая—значительно ниже.

Вслѣдствіе результата, полученнаго Леру (§ 195), линія для свинца взята за ось абсциссъ, вдоль которой отложены температуры.

При построеніи діаграммы употреблялась вспомога-

*) *Proc. R. S.*, vol. XII, и *Camb. Phil. Trans.*

**) *Pogg. Ann.*, 119.

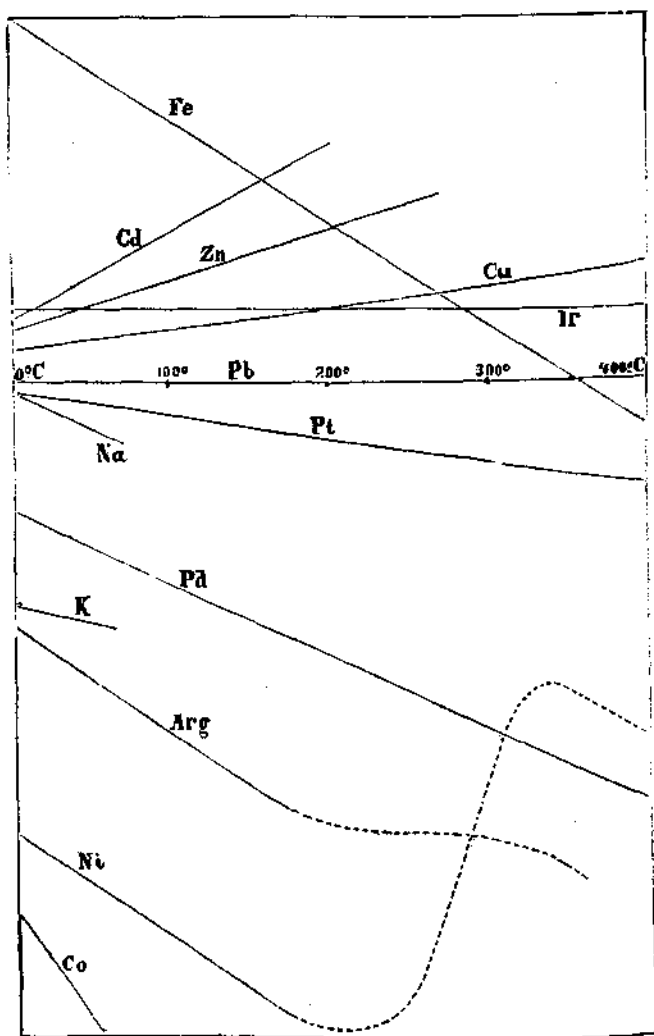


FIG. 38.

тельная цѣпь изъ двухъ сплавовъ иридія съ платиной. Удѣльная теплота электричества въ каждомъ изъ этихъ сплавовъ чрезвычайно мала; но она должна существовать, по крайней мѣрѣ, въ одномъ изъ нихъ, такъ какъ эти сплавы имѣютъ нейтральную точку, лежащую нѣсколько ниже бѣлокалильнаго жара. Объясненія, которыя только что нами даны, показываютъ, что э. д. с. цѣпи изъ этихъ сплавовъ въ широкихъ предѣлахъ температуры должна быть почти точно пропорціональна разности абсолютныхъ температуръ спаевъ. Такое сочетаніе чрезвычайно удобно замѣняетъ термометръ, когда не требуется большой точности; оно было необходимо при изслѣдованіи своеобразной формы линіи желѣза при высокихъ температурахъ—которая тотчасъ будетъ описана.

Единственная линія въ діаграммѣ, которая требуетъ особеннаго замѣчанія, есть линія никкеля. Ея положеніе и форма съ удобствомъ изслѣдуются (какъ явствуетъ и изъ діаграммы) посредствомъ цѣпи изъ никкеля и палладія. Тогда находятъ, что удѣльная теплота электричества въ никкелѣ, отрицательная при обыкновенныхъ температурахъ, мѣняетъ свой знакъ около 200°C и еще разъ около 320°C .

199. Желѣзо показываетъ ту же особенность, какъ и никкель, но при гораздо высшей температурѣ. Его линія въ діаграммѣ пересѣкаетъ линію одного изъ упомянутыхъ выше сплавовъ иридія съ платиной (назовемъ его *N*), по меньшей мѣрѣ, *три* раза ниже температуры начинающагося бѣлаго каленія. Другими словами, цѣпь изъ желѣза и сплава *N* имѣетъ, по меньшей мѣрѣ, три нейтральныхъ точки.

Если мы нагрѣемъ спай такой цѣпи до температуръ, соотвѣствующихъ двумъ изъ этихъ точекъ, то разви-

вающійся токъ будетъ сполна обусловленъ Томсоновскимъ явленіемъ, т. е. избыткомъ теплоты, поглощаемой въ одной части желѣза, надъ теплотою, выдѣляющеюся въ остальной; ибо въ сплавѣ *N* (какъ мы видѣли) Томсоновское явленіе, если оно есть, очень мало.

Съ другой стороны, термоэлектрическій токъ въ цѣпи изъ названныхъ двухъ сплавовъ прйдя съ платиной, каковы бы ни были температуры спаевъ, почти сполна обуславливается явленіемъ Пельтье.

Указанныя выше особенности никкеля и желѣза, по всей вѣроятности, связаны съ измѣненіями ихъ магнитныхъ свойствъ, которыя происходятъ, по Фарадею, при тѣхъ же самыхъ температурахъ. Если и кобальтъ обладаетъ подобными же особенностями, то, основываясь на данныхъ Фарадея, мы должны ожидать ихъ еще при высшихъ температурахъ, чѣмъ для желѣза.

200. На дѣлѣ очень трудно наносить относительное термоэлектрическое положеніе двухъ металловъ на діаграмму для проведенія линіи одного изъ нихъ (когда другая проведена предположительно или уже опредѣлена)—если линіи не имѣютъ нейтральной точки (пересѣченія) въ предѣлахъ діаграммы или, по крайней мѣрѣ, не лежатъ достаточно близко одна отъ другой. Ибо, если онѣ очень далеки, то *измѣненія* э. д. с., какъ бы они ни были велики сами по себѣ, обыкновенно малы сравнительно со всѣмъ измѣряемымъ количествомъ и такимъ образомъ могутъ въ значительной степени потеряться въ неизбѣжныхъ погрѣшностяхъ наблюденія.—Линіи, приведенныя въ нашей діаграммѣ, разбросаны весьма неправильно.

Но помощью очень простаго приема можно составить себѣ понятіе о термоэлектрическихъ свойствахъ металла,

котораго линія лежитъ гдѣ либо *между* линіями двухъ данныхъ металловъ.

Для этой цѣли мы употребляемъ *двойную дугу* изъ этихъ металловъ. Проволока, положимъ, изъ золота и проволока изъ платины помѣщаются рядомъ и спаиваются только своими концами: по длинѣ онѣ не касаются другъ друга; такое сочетаніе (разсматриваемое какъ одна проволока) будетъ имѣть линію, проходящую чрезъ нейтральную точку золота и платины и лежащую термоэлектрически между линіями этихъ двухъ металловъ. Ея положеніе между ними опредѣляется относительнымъ электрическимъ сопротивленіемъ отдѣльныхъ проволокъ двойной дуги.—Мы зашли бы слишкомъ далеко въ науку объ электричествѣ, еслибъ захотѣли привести здѣсь вычисленія; слѣдующее положеніе (изъ *Camb. Math. Tripos. Exam.* 1875), содержащее все необходимое для опытнаго выполненія приема, будетъ достаточно.

Пусть проволоки изъ трехъ металловъ A, B, C , которыхъ сопротивленія a, b, c , соединены своими концами въ двухъ спаяхъ, поддерживаемыхъ при (различныхъ) постоянныхъ температурахъ. Положимъ, что когда перерзана проволока A , сила тока есть I_a , а когда перерзана проволока B , сила тока есть I_b ; тогда сила тока въ C , если всѣ проволоки цѣлы, будетъ

$$\frac{a(b+c)I_a + b(c+a)I_b}{bc+ca+ab}$$

На опытѣ сопротивленіе c включаетъ и сопротивленіе гальванометра, которое обыкновенно велико сравнительно съ a или b ; вслѣдствіе этого формула принимаетъ,

съ достаточнымъ приближеніемъ, слѣдующій весьма простой видъ:

$$\frac{aI_a + bI_b}{a + b}$$

Съ помощью такого приѣма мы можемъ пополнить всѣ пробѣлы въ діаграммѣ.

201. Въ заключеніе этой части нашего предмета приводимъ таблицу приблизительныхъ термоэлектрическихъ данныхъ для нѣсколькихъ обыкновенныхъ металловъ. Изъ нихъ видно, какимъ образомъ проводятся линіи діаграммы между 0° и 350°C. Различные образцы одного и того же металла даютъ не очень согласные между собою результаты, такъ что числа приводятся здѣсь съ тѣми же ограниченіями, какъ въ §§ 104, 153 и др.

Нейтральныя точки по отношенію къ свинцу.

Ni	(-424°)	Ag	- 144°	Sn	+ 75°	Sb	- 156°
Au	(-276)	Cu	- 132	Ru	+ 136	Pb	...
Arg ¹⁾	-238	Zn	- 95	Al	+ 212	Rd	+ 132
Co	-228	Cd	- 59	Mg	+ 239	Ir	∞
Pd	-172	Pt	- 56	Fe	+ 356	Bi	(- 580)

[Числа въ скобкахъ, конечно, не суть температуры].

Удельная теплота электричества.

Fe	...	-0,00247	Au	...	+0,00052
Pt (мягкая)	...	-0,00056	Cu	...	+0,00048
Ir	...	-0,00000	Pb	...	0,00000
Mg	...	-0,00048	Sn	...	+0,00028
Arg	...	-0,00260	Pd	...	-0,00182

¹⁾ Знакомъ Arg авторъ обозначаетъ то, что у англичанъ наз. German Silver, т. е. сплавъ мѣди, цинка и никкеля (аргентанъ, мельхюръ, новое серебро, также нейзильберъ). То же обозначеніе встрѣчается на діаграммѣ стр. 214.

Зам. р. перев.

Cd	+0,00218	Ni (до 175°C.) . .	—0,00260
Zn	+0,00122	Ni (250°—310°C.)	+0,01225
Ag	+0,00076	Ni (отъ 340°C) .	—0,00180
Ru	—0,00106	Rd	—0,00058
Sb	+0,01140	Bi	—0,0055
Co	—0,00585	Al	+0,0002

Числа послѣдней таблицы должны быть умножены на абсолютную температуру по термометру С. Единица, употреблявшаяся при измѣреніяхъ, соотвѣтствуетъ приблизительно 10^{-3} электродвигательной силы одного элемента Грове. Эта единица принята для того, чтобы читатель могъ составить себѣ понятіе о чрезвычайно слабомъ напряженіи термоэлектрическихъ токовъ вообще. Способъ вычисленія э. д. с. въ цѣпи изъ двухъ металловъ будетъ показанъ позже, когда мы будемъ разсматривать термодинамическую теорію цѣпи.

202. До сихъ поръ мы имѣли дѣло съ проволоками изъ одного и того же матеріала и одного и того же сѣченія во всѣхъ мѣстахъ. Магнусъ давно показалъ, что различія поперечнаго сѣченія въ какихъ-либо частяхъ цѣпи не оказываютъ вліянія на эл.-двигательную силу. Но вслѣдствіековки, гнутія, скручиванія и вообще вслѣдствіе всякаго внутренняго натяженія въ части цѣпи, образованной однимъ лишь металломъ, эта цѣпь получаетъ способность давать термоэлектрическій токъ, будучи неравномѣрна нагрѣта. Измѣненная часть цѣпи относится къ неизмѣненной такъ, какъ бы она была изъ другого металла. Въ желѣзѣ, никкелѣ и др. такое же явленіе можетъ быть произведено намагничиваніемъ части проволоки. Было также найдено, что если оба конца проволоки имѣютъ различныя температуры и приводятся

во взаимное соприкосновение, то возникает (весьма кратковременный) токъ.

203. *Содержаніе §§ 189—202.* Общія свойства термоэлектрической цѣпи, найденныя опытомъ. Слѣдствія. Опредѣленіе «термоэлектрической способности». Явленіе Пельтье. Нейтральная точка. Явленіе Томсона. Удѣльная теплота электричества въ металлѣ. Термоэлектрическая діаграмма. Какъ она изображаетъ э. д. с., явленія Пельтье и Томсона. Способъ опытнаго построенія діаграммы. Аномаліи, представляемыя никкелемъ и желѣзомъ. Цѣпи, въ которыхъ нѣтъ (а) Томсоновскаго явленія, (б) явленія Пельтье. Отсутствіе вліянія различной толщины проволокъ. Вліяніе неравномернаго внутреннего натяженія въ проволокахъ.

ГЛАВА XII.

Другія дѣйствія теплоты.

204. Въ этой главѣ мы намѣрены собрать нѣсколько отрывочныхъ замѣтокъ о такихъ тепловыхъ дѣйствіяхъ, разсмотрѣніе которыхъ нарушило бы невыгоднымъ образомъ связь между болѣе важными подраздѣленіями нашего предмета; пользуясь случаемъ, мы присоединимъ сюда и другія, которыя еще не могутъ быть приведены въ строгую систему. Такимъ образомъ, напримѣръ, намъ можно будетъ сказать нѣсколько словъ о химической сторонѣ нашего предмета, отлагая собственно разсмотрѣніе теплоты соединенія до слѣдующей главы.

205. Любопытный примѣръ механическаго движенія, производимаго непосредственно расширеніемъ, представляетъ такъ-называемый *Трезеліановскій опытъ*. Кусокъ нагрѣтаго металла кладется на кусокъ холоднаго, обыкновенно на свинецъ, который передъ тѣмъ былъ опилень и очищенъ (для освобожденія отъ окиси) въ томъ мѣстѣ, гдѣ металлы должны соприкасаться. Если нагрѣтый металлъ имѣетъ надлежащую форму и помещень такъ, что онъ можетъ свободно колебаться на своихъ опорахъ, то

колебаніе, разъ оно начато, становится все быстрѣе и наконецъ производитъ нѣкотораго рода музыкальный звукъ, который продолжается часто до тѣхъ поръ, пока оба тѣла не пріобрѣтутъ почти одинаковой температуры. Объясненіе этого явленія, данное Лесли и подтвержденное Фарадеемъ, заключается просто въ томъ, что на поверхности холоднаго металла въ точкѣ соприкосновенія его съ горячимъ образуется возвышеніе столь быстро, что нагрѣтое тѣло перебрасывается на другую сторону, гдѣ съ нимъ повторяется то же самое. Прежде, чѣмъ оно возвратится къ своему первоначальному положенію, возвышеніе на холодномъ кускѣ уже исчезаетъ, такъ какъ теплота успѣваетъ проникнуть путемъ проводимости въ самую массу металла, и явленіе повторяется до тѣхъ поръ, пока температуры обоихъ тѣлъ не сдѣлаются почти одинаковыми.

Дѣйствіе часто можно значительно усилить, если въ кускѣ свинца сдѣлать вырѣзъ, такъ чтобы колеблющееся тѣло прикасалось къ свинцу послѣдовательно по ту и по другую сторону вырѣза.

Быстрота колебаній и, слѣдовательно, высота звука обыкновенно очень измѣняются при болѣе или менѣе сильномъ надавливаніи колеблющагося тѣла на холодный металлъ; при нѣкоторомъ умѣнніи удастся такимъ образомъ получать крайне своеобразные звуки, иногда почти голосовые.

206. Интересный примѣръ дѣйствія теплоты на такъ называемыя «молекулярныя силы» представляетъ то измѣненіе, которое производится ею въ капиллярныхъ явленіяхъ.

Кривизна поверхности воды и другихъ жидкостей въ волосной трубкѣ вообще уменьшается съ повышеніемъ

температуры; въ то же время уменьшается и поверхностное натяженіе. По этимъ двумъ причинамъ высота поднятія или пониженія жидкости въ волосной трубкѣ тѣмъ меньше, чѣмъ выше температура.

Первое изъ названныхъ явленій легко замѣтить при тщательномъ наблюденіи, второе же доказывается множествомъ простыхъ опытовъ.

Такъ, если помѣстить тонкій слой воды значительной поверхности на большую металлическую пластинку и подогрѣть средину пластинки маленькимъ пламенемъ лампы, то дѣйствіе будетъ то же самое, какъ на туго натянутую каучуковую перепонку. Сильнѣйшее поверхностное натяженіе болѣе холодной воды производитъ то, что поверхностный слой болѣе теплой воды разрывается, и мы такимъ образомъ имѣемъ явленіе подобное тому, какое происходитъ, если въ средину водяной поверхности капнуть спиртомъ или эфиромъ. Въ одномъ случаѣ чрезъ короткое время вся вода стягивается съ нагрѣтаго мѣста, въ другомъ—съ того мѣста, на которое капнули спиртомъ.

Мы поймемъ также, почему капля припоя кажется какъ бы отталкиваемой отъ болѣе горячихъ частей паяльника къ болѣе холоднымъ.

207. Еще любопытное явленіе, тѣсно связанное съ этою частью нашего предмета, есть дѣйствіе *кривизны* жидкой поверхности на давленіе насыщеннаго пара, находящагося въ равновѣсіи въ соприкосновеніи съ жидкостью.

Если нѣсколько узкихъ трубокъ, открытыхъ съ обоихъ концовъ, опустить въ воду (положимъ, въ сосудѣ, изъ котораго удаленъ воздухъ), то вода подымается въ разныхъ трубкахъ тѣмъ выше, чѣмъ больше будетъ кривизна поверхности воды. Въ то же время давленіе пара тѣмъ

меньше, чѣмъ больше высота поднятія воды. Поэтому, чѣмъ вогнутѣе ея поверхность, тѣмъ меньше давленіе насыщеннаго пара, находящагося съ ней въ соприкосновеніи. Если теперь запереть трубки снизу, оставивъ въ нихъ немного воды, то произойдетъ испареніе или сгущеніе, смотря по тому, выше или ниже прежняго будетъ уровень жидкости въ трубкѣ, и это продолжится до тѣхъ поръ, пока высота воды надъ поверхностью ея въ сосудѣ не уравниется съ тою, какая была, когда нижніе концы трубокъ были открыты. В. Томсонъ, впервые обратившій вниманіе на это явленіе, полагаетъ, что имъ объясняется большое количество воды, поглощаемое изъ влажнаго воздуха мелко-пористыми тѣлами, какъ напр. хлопчатой бумагою и т. п. Клеркъ-Максвелль указалъ, что оно объясняетъ также возрастаніе большихъ капель въ облакѣ насчетъ меньшихъ и, по крайней мѣрѣ отчасти, тѣ явленія въ маленькихъ пузырькахъ пара, которыми обусловливается такъ-называемое «пѣніе» котла съ водою передъ самымъ началомъ кипѣнія.

208. Это подаетъ намъ поводъ сдѣлать нѣсколько замѣчаній относительно кипѣнія.

Въ металлическомъ сосудѣ вода кипитъ при болѣе низкой температурѣ, чѣмъ въ стеклянномъ.

Если изъ воды тщательно удаленъ воздухъ, то оказывается, что можно осторожнымъ нагреваніемъ ея въ гладкомъ сосудѣ повысить температуру воды на много градусовъ выше точки кипѣнія, соответствующей давленію, которому вода подвержена. Но если въ перегрѣтую такимъ образомъ воду бросить нѣсколько металлическихъ обрѣзковъ, стружекъ или вообще какое нибудь твердое тѣло съ острыми ребрами или оконечностями, то вода тотчасъ же приходитъ въ бурное кипѣ-

ніе. Возможно, что это явленіе находится въ связи со взрывами паровыхъ котловъ, по крайней мѣрѣ въ тѣхъ случаяхъ, когда въ котелъ не было прибавлено воды за нѣкоторое время до взрыва.

Эти явленія еще не вполне выяснены; но повидимому для закипанія необходимо нѣкотораго рода ядро, точно такъ, какъ оно необходимо для сжиженія (§ 176).

209. Очень своеобразный примѣръ взрывчататаго кипѣнія мы имѣемъ на Исландскихъ гейзерахъ, или вулканическихъ горячихъ источникахъ. Явленіе это тщательно изучено Бунзеномъ и Деклуазо (*Liebig's Annalen*, 1847).

Они опредѣляли температуру воды на различныхъ глубинахъ жерла Большого Гейзера въ разные промежутки времени до и послѣ большого изверженія, и на этихъ наблюденіяхъ Бунзенъ основалъ свою теорію дѣятельности Гейзера.

Было найдено, что между двумя изверженіями температура воды въ жерлѣ возрастала отъ поверхности въ глубь, но нигдѣ не достигала точки кипѣнія, соответствующей суммѣ давленій атмосферы и вышележащаго столба воды. Температура постепенно росла въ каждой точкѣ, такъ какъ паръ и очень горячая вода притекали снизу и вѣроятно также съ боковъ жерла, пока наконецъ небольшое перемѣщеніе водяного столба вверхъ, по направленію къ бассейну, не понижало давленія въ какой-либо части жерла до величины, соответствующей точкѣ кипѣнія. Это происходило обыкновенно на глубинѣ около семидесяти футовъ отъ поверхности. Тогда наступало бурное вскипаніе, вслѣдствіе котораго выбрасывалась верхняя часть водяного столба; освободившіяся отъ давленія нижнія части въ свою оче-

редь закипали со взрывомъ. Послѣ этого въ жерло вливалась изъ бассейна болѣе холодная вода, и опять начиналось постепенное нагрѣваніе снизу.

Легко показать явленіе въ маломъ видѣ, производя искусственно то распредѣленіе температуры, которое наблюдается въ жерлѣ Гейзера, и такимъ образомъ вполне подтвердить правильность Бунзеновой теоріи ¹⁾.

210. Въ §§ 60, 134, опредѣляя постоянныя точки Ньютоновой термометрической шкалы, мы употребили выраженія *чистый ледъ* и *чистая вода*. Это, конечно, значитъ, что точки замерзанія и кипѣнія воды (а также другихъ жидкостей) измѣняются вслѣдствіе содержанія въ растворѣ примѣсей. [Механически взвѣшенныя примѣси, какъ напр. въ грязной водѣ, не производятъ вообще измѣримаго вліянія].

Что касается точки замерзанія, то самый важный случай представляетъ намъ растворъ обыкновенной соли въ водѣ. Найдено, что растворенная въ водѣ соль значительно понижаетъ точку замерзанія. Уокеръ (въ экспедиціи *Fox'a*) нашелъ, что точка замерзанія обыкновенной морской воды ниже 28,5°F (около—2°C). Онъ замѣтилъ, однако, что значительная часть соли выдѣляется изъ льда. Онъ пробовалъ расплавлять этотъ ледъ и снова замораживать воду, повторяя такъ нѣсколько разъ, въ надеждѣ получить воду годную для питья. Хотя точка замерзанія каждый разъ становилась выше, но вода еще осталась солоноватой послѣ четырехкратнаго повторенія процесса. Наименьшій удѣльный вѣсъ полученной та-

¹⁾ См. объ этомъ въ книгѣ Тиндала «Теплота, разсматриваемая какъ родъ движенія», пер. Шимкова, стр. 91—96.

Зам. р. перев.

кимъ образомъ жидкости былъ отъ 1,0025 до 1,002. Уокеръ пробовалъ поступать и наоборотъ: онъ снималъ съ воды ледяную кору, образовавшуюся въ наполненной морскою водою трубкѣ при температурахъ все болѣе и болѣе низкихъ, чтобы найти, какой крѣпости рассоль можетъ быть такимъ образомъ полученъ.

211. Сдѣланы очень обширныя и тщательныя изслѣдованія надъ точками кипѣнія водныхъ растворовъ различныхъ солей при разной концентраціи. Во всѣхъ случаяхъ точка кипѣнія выше 100°C , и величина повышенія приблизительно пропорціональна процентному содержанію соли въ растворѣ; коэффициентъ пропорціональности различенъ для разныхъ солей. Растворы эти при кипѣніи отдѣляютъ почти чистый водяной паръ; и не разъ указывалось на то, что какъ-бы высока ни была точка кипѣнія раствора, отдѣляющійся паръ имѣетъ температуру, соответствующую (по таблицѣ Реньо) внѣшнему давленію. Нельзя сомнѣваться, судя по опытамъ Реньо и другихъ, что термометръ, помѣщенный въ отдѣляющіеся пары, дѣйствительно указываетъ почти точно ту температуру, которая соответствуетъ давленію. Но слѣдуетъ замѣтить, что водяной паръ предъ тѣмъ самымъ моментомъ, какъ онъ покидаетъ жидкость, навѣрное перегрѣтъ, и что этотъ перегрѣтый паръ, свободно отдѣляясь отъ жидкости въ закрытомъ отчасти сосудѣ, скоро дѣлается насыщеннымъ паромъ, который и осаждаетъ слой воды на шарикѣ термометра. Такимъ образомъ температура шарика есть температура, при которой чистая вода и паръ находятся въ равновѣсіи подъ даннымъ давленіемъ; слѣдовательно, этотъ способъ наблюденія обманчивъ. Мы еще не имѣемъ надежнаго способа опредѣлить истинную тем-

пара, послѣдніе должны быть разрѣжены, чтобы *средняя длина свободнаго пути частицы* (гл. XXII) могла значительно увеличиться.

214. Этимъ простымъ соображеніемъ объясняются главные явленія, представляемыя *радіометромъ*. Радиометръ въ главныхъ чертахъ состоитъ изъ нѣсколькихъ очень легкихъ крыльевъ, прикрѣпленныхъ къ оси, около которой они могутъ свободно вращаться. Одна сторона каждого крыла зачернена (чтобы она поглощала теплоту), другая отполирована. Все приспособленіе помѣщается въ очень разрѣженномъ пространствѣ. Если крылья подвергнуть дѣйствію лучей, то со стороны зачерненной ихъ поверхности развивается большее давленіе, чѣмъ съ полированной, и аппаратъ начинаетъ вращаться *). Первые опытные результаты, которые повидимому вели къ подобному объясненію, были добыты Френелемъ; но они остались незамѣченными.

215. При нѣкоторой осторожности воду можно привести въ сфероидальное состояніе и въ стеклянномъ сосудѣ, напр. на часовомъ стеклѣ. Но для успѣха опыта вода должна уже имѣть приблизительно температуру кипѣнія въ тотъ моментъ, какъ она попадаетъ на стекло. Можно даже получить водяной сфероидъ на поверхности очень горячаго масла. Но при этомъ требуется большая осторожность, такъ какъ часто случаются взрывы, при которыхъ горячее масло разбрасывается во всѣ стороны.

216. Другая разительная форма опыта состоитъ въ томъ, что погружаютъ въ воду серебряный шаръ, нагрѣтый почти до точки плавленія. Шаръ остается расплавленнымъ въ водѣ въ теченіе нѣсколькихъ секундъ

*) Dewar and Tait, *Nature*, XII, 217.

(охлаждаясь, однако, быстрее, чѣмъ онъ охладился бы въ воздухѣ), какъ вода вдругъ приходитъ съ нимъ въ соприкосновеніе: происходитъ слабый взрывъ, и шаръ дѣлается темнымъ. Опытъ значительно облегчается, если къ водѣ предварительно прибавить нѣсколько амміаку.

217. Брюстеръ давно открылъ, что во многихъ образцахъ топаза и другихъ кристалловъ имѣются внутри пустоты, обыкновенно микроскопическія, которыя частью наполнены жидкостью. Sang наблюдалъ, какъ маленькіе газовые пузырьки въ жидкости, содержащейся въ пустотахъ исландскаго шпата, передвигаются по направленію къ той сторонѣ пустоты, съ которой температура кристалла будетъ немного повышена. Когда стѣнки газоваго пузырька отчасти образованы самимъ твердымъ тѣломъ, тогда сказанный любопытный фактъ, вѣроятно, объясняется капиллярными явленіями, описанными выше, въ § 206. Но когда пузырекъ вполне окруженъ жидкостью, тогда его движеніе, повидимому, только кажущееся: на самомъ дѣлѣ происходитъ перегонка жидкости съ болѣе теплой стороны пузырька къ болѣе холодной, гдѣ вновь происходитъ сгущеніе. Это объясненіе, кажется, согласно съ фактами, такъ какъ жидкость обыкновенно есть угольный ангидридъ и находится подъ значительнымъ давленіемъ. Весьма сходныя явленія могутъ быть произведены въ болѣе большихъ размѣрахъ, если запаять въ трубку жидкій сѣрнистый ангидридъ и приблизить теплое тѣло къ маленькому пузырьку, находящемуся внутри жидкости.

218. *Предохранительная лампа Дэви* (рис. 39) есть простая лампа, окруженная проволоочною сѣткой. Дэви нашелъ, что *пламя* не можетъ, кромѣ нѣкоторыхъ исключительныхъ случаевъ, проникнуть сквозь такую сѣт-

ку. Если пламя бунзеновской горѣлки покрыть не слишкомъ крупною проволоочною сѣткою, то пламя задержи-

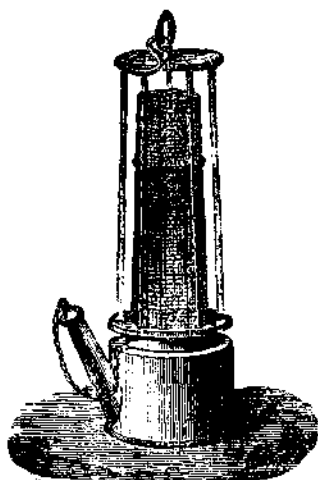


Рис. 39.

вается ею, хотя проникающая сквозь нее газовая смѣсь въ высокой степени воспламеняема, въ чемъ можно убѣ-

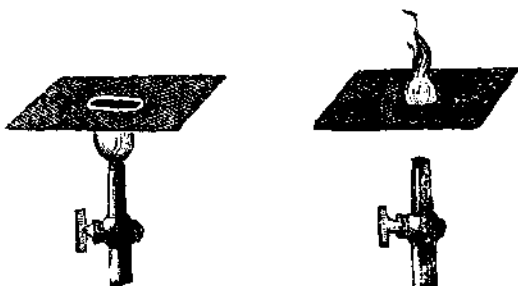


Рис. 40.

диться, поднося зажженую спичку. Можно также, не зажигая предварительно лампу, зажечь газъ надъ сѣт-

кою, и пламя не распространится на ту часть взрывчатой смѣси, которая находится подъ сѣткой (см. рис. 40). Въ слѣдующей главѣ мы увидимъ, что воспламенение подобной смѣси начинается при нѣкоторой определенной температурѣ. Теплопроводимость сѣтки (см. ниже, гл. XIV) препятствуетъ тому, чтобы нагреваемая часть достигли этой температуры.—Наши дальнѣйшія замѣчанія относительно пламени войдутъ въ составъ слѣдующей главы.

219. *Содержаніе §§ 204—218. Опытъ Тревеліана. Дѣйствіе теплоты на молекулярныя силы. Давленіе пара, находящагося надъ кривою поверхностью жидкости. Кипѣніе при ненормальныхъ условіяхъ. Гейзеры. Точки замерзанія и кипѣнія водныхъ растворовъ. Сфероидальное состояніе. Радиометръ. Движеніе газовыхъ пузырьковъ. Предохранительная лампа.*

ГЛАВА XIII.

Соединеніе и диссоціація.

220. См. §§ 47, 51, 155—7. Какъ уже замѣчено въ § 38, мы почти ничего не знаемъ о томъ, въ какой именно формѣ энергія существуетъ въ тѣлѣ. Мы можемъ вообще измѣрять количества энергіи, принимаемой тѣломъ или выделяемой имъ, и можемъ указать форму энергіи въ томъ и другомъ случаѣ. Но мы видѣли, что такія молекулярныя измѣненія, какъ плавленіе, раствореніе, отвердѣваніе, кристаллизація и т. д. сопровождаются обыкновенно поглощеніемъ или развитіемъ теплоты. Мы приписываемъ эти тепловыя явленія работѣ, производимой или противъ такъ-называемыхъ молекулярныхъ силъ, или же ими самими. Это, конечно, только гипотеза; но гипотеза, стоящая въ согласіи съ закономъ сохраненія энергіи. Истинная природа процесса намъ совершенно неизвѣстна. Нельзя ожидать, чтобы при современномъ состояніи науки мы достигли чего-нибудь болѣе удовлетворительнаго и въ отношеніи тѣхъ глубокихъ измѣненій, которыя происходятъ при такъ-называемомъ химическомъ соединеніи. Однако то малое,

что намъ извѣстно, очень важно какъ съ физической, такъ и съ чисто химической точекъ зрѣнія. Въ практическомъ же отношеніи это одна изъ важнѣйшихъ частей нашего предмета, такъ какъ она непосредственно касается почти всѣхъ нашихъ искусственныхъ приѣмовъ произведенія теплоты.

221. Съ перваго взгляда можно подумать, основываясь на нѣкоторыхъ общезвѣстныхъ опытахъ, что о предметахъ этого рода нельзя получить опредѣленныхъ указаній. Ибо мы можемъ заставить одни и тѣ же два тѣла соединиться многими различными путями. Такъ, беря простой примѣръ, мы можемъ сжечь струю водорода въ атмосферѣ кислорода, взявъ оба газа при нѣкоторой обыкновенной температурѣ; или же мы можемъ, смѣшавъ сперва нашъ водородъ и кислородъ въ надлежащемъ отношеніи при той же самой температурѣ, подвергнуть смѣсь дѣйствию зажженной спички или электрической искры. Первый процессъ мы можемъ произвести почти такъ тихо и спокойно, какъ пожелаемъ; второй (въ сосудѣ умѣренныхъ размѣровъ) совершается почти мгновенно *) и сопровождается всѣми физическими явленіями сильнаго взрыва. Но, взглянувъ на оба процесса съ точки зрѣнія основнаго начала Карно (§ 85), мы видимъ, что если въ обоихъ случаяхъ образовалось одинаковое количество воды, и она достигла того же самаго конечнаго состоянія, то количество освободившейся энергіи въ томъ и другомъ процессѣ должно быть одинаково. Въ случаѣ медленнаго горѣнія энергія почти

*) Поверхность соединенія распространяется въ каждой взрывчатой смѣси газовъ съ опредѣленною скоростью; но она обыкновенно велика сравнительно съ размѣрами употребительныхъ аппаратовъ.

вся отдѣляется въ формѣ теплоты; при взрывѣ значительная часть ея является сперва въ формѣ звука и обыкновенной механической энергіи: та и другая превращаются окончательно тоже въ теплоту. Количество произведенной теплоты должно быть въ обоихъ случаяхъ одинаково, если продукты приведены къ одному и тому же конечному состоянію. До сихъ поръ все въ порядкѣ. Но положимъ, что смѣшанные газы были предъ самымъ взрывомъ нагрѣты до температуры высшей, чѣмъ та, при которой происходило медленное сжиганіе: будетъ ли полное количество энергіи, развиваемое взрывомъ, то же самое, какъ въ первомъ случаѣ? Въ настоящее время мы лишь указываемъ на представляющееся здѣсь затрудненіе.

222. Мы вышли бы далеко за предположенныя границы, еслибъ захотѣли, даже не входя въ подробности, дать полный очеркъ предмета подобнаго этому, предмета, который разрабатывался во многихъ направленіяхъ лучшими экспериментаторами. Мы поэтому ограничимся тѣмъ, что приведемъ (въ дополненіе къ сказанному въ §§ 69, 155, 156) слѣдующіе факты.

Теплота развивается, часто въ значительномъ количествѣ, когда такіе газы, какъ хлоръ, хлористый или іодистый водородъ растворяются въ водѣ. Часть этой теплоты, конечно, обусловливается превращеніемъ газообразнаго состоянія въ жидкое. Но остальная берется вслѣдствіе того самаго процесса, который имѣетъ мѣсто въ нижеслѣдующихъ случаяхъ.

Когда жидкости, напр. продажная сѣрная кислота, спиртъ и др., разводятся водою, тогда обыкновенно наблюдается развитіе теплоты, сопровождающееся уменьшеніемъ объема.

Но при простомъ смѣшиваніи жидкостей теплота развивается не во всѣхъ случаяхъ. Напримѣръ, тогда какъ при смѣшеніи 27 частей (по вѣсу) воды съ 23 частями спирта, взятыхъ при обыкновенной температурѣ, температура смѣси *повышается* приблизительно на $8^{\circ},3$ С, — смѣшивая 31 часть (по вѣсу) сѣрнистаго углерода съ 19 частями спирта при той же температурѣ, мы получаемъ *пониженіе* температуры смѣси на $5^{\circ},9$ С. Но прямыми опытами найдено, что теплоемкость (§ 183) смѣси въ первомъ случаѣ приблизительно на $\frac{1}{8}$ больше суммы теплоемкостей составныхъ частей; тогда какъ во второмъ случаѣ этотъ избытокъ составляетъ лишь около $\frac{1}{16}$. Съ другой стороны, объемъ первой смѣси на $3,6\%$ *меньше* суммы объемовъ составныхъ частей, а второй — на $1,7\%$ *больше* ихъ. Первое изъ этихъ дополнительныхъ наблюденій идетъ въ разрѣзъ съ названными выше тепловыми явленіями, второе согласуется съ ними. Легко видѣть отсюда значительную сложность предмета, и мы не можемъ здѣсь развивать его дальше.

Мы, впрочемъ, упомянемъ, что были сдѣланы опыты надъ смѣсями одной и той же пары жидкостей при различныхъ начальныхъ температурахъ (общихъ обѣимъ жидкостямъ). И надо думать (согласно Бертело), что удѣльная теплота смѣсей столь же измѣняется съ температурою, какъ и несмѣшанныхъ жидкостей—такъ что напр. упомянутая выше смѣсь сѣрнистаго углерода со спиртомъ показала бы *выдѣленіе* теплоты, если бы обѣ составныя части были взяты при температурѣ ниже 0°C .

223. Приложеніе великихъ законовъ термодинамики (§§ 37, 82) къ химическому соединенію, по крайней мѣрѣ въ основахъ, не представляетъ большой трудности.

Опытная часть работы была выполнена очень искусно многими изслѣдователями, между которыми въ особенности извѣстны Эндрьюсъ, Фавръ и Зильберманъ и (въ болѣе новое время) Бертелло, Девиаль и Томсонъ. Мы должны отмѣтить лишь наиболѣе выдающіяся черты этого предмета.

Изъ перваго закона слѣдуетъ, что если какая-либо смѣсь испытываетъ опредѣленное химическое измѣненіе, при которомъ не расходуется и не производится работы, то количество развиваемой или поглощаемой теплоты зависитъ только отъ начального и конечнаго состоянія системы и отнюдь не зависитъ отъ промежуточныхъ превращеній. Это положеніе составляетъ, съ одной стороны, большое приобрѣтеніе, такъ какъ оно очень упрощаетъ заключеніе изъ результатовъ опыта; но, съ другой стороны, оно имѣетъ ту невыгоду, что ставитъ насъ въ невозможность (однимъ только этимъ способомъ) получить какія-либо указанія о природѣ и порядкѣ послѣдовательныхъ стадій сложной реакціи.

Далѣе, въ какомъ-либо превращеніи, совершающемся безъ приложенія или отдачи работы, количество развивающейся теплоты эквивалентно избытку первоначальной потенціальной энергіи химическихъ средствъ надъ конечною. [Мы говоримъ здѣсь только о развивающейся теплотѣ. Причина такого ограниченія будетъ видна изъ слѣдующаго §].

Согласно второму закону термодинамики (или его слѣдствію, пониженію энергіи), конечное состояніе всякой системы есть то, въ которомъ потенціальная энергія химическаго средства имѣетъ наименьшую величину; или—что въ сущности то же самое—происходящія реакціи таковы, что выделяютъ наибольшее количество те-

плоты. И наоборотъ, образовавшіяся такимъ путемъ соединенія требуютъ для своего разложенія сообщенія энергій откуда-либо извнѣ.

224. Какъ простой примѣръ, положимъ, что одинаковыя количества водорода вступаютъ въ соединеніе съ кислородомъ — все равно какимъ образомъ. При этомъ (сколько мы знаемъ) могутъ образоваться только два соединенія, вода и перекись водорода. Теплота образованія первой приблизительно на 50% больше, нежели второй. Поэтому, когда водородъ и кислородъ непосредственно дѣйствуютъ другъ на друга, образуется только вода, а избытокъ того или другого газа просто остается несоединеннымъ. И, согласно второму положенію § 223, еслибы мы захотѣли окислить воду въ перекись водорода, мы должны были-бы сообщить количество энергій, равное избытку теплоты соединенія двухъ атомовъ водорода съ однимъ атомомъ кислорода надъ теплотою соединенія двухъ атомовъ водорода съ двумя атомами кислорода.

Поэтому мы должны ожидать, какъ это и есть на дѣлѣ, что перекись водорода представляетъ непрочное соединеніе. Энергія, необходимая для образованія подобныхъ соединеній, обыкновенно доставляется какою-либо непосредственно идущею реакціей (при которой образуется прочное соединеніе), совершающейся одновременно съ первою. Такъ, перекись водорода получается одновременно съ образованіемъ хлористаго барія изъ перекиси барія в разведенной хлористоводородной кислоты.

225. Мы видѣли, что соединеніе, образовавшееся чрезъ прямое взаимодѣйствіе составныхъ частей съ выдѣленіемъ теплоты, характеризуется прочностью. Для разложенія его требуется приложеніе энергій извнѣ. Такъ,

въ нашемъ примѣрѣ, перекись барія и хлористоводородная кислота суть прочныя тѣла, потому что каждое изъ нихъ образуется изъ элементовъ съ выдѣленіемъ теплоты. Но смѣсь этихъ двухъ тѣлъ неустойчива, ибо возможна новая перегруппировка элементовъ, при которой произойдетъ дальнѣйшее развитіе теплоты. Здѣсь необходимая для разложенія энергія доставляется химическимъ процессомъ.

Но эта энергія можетъ быть доставлена и многими другими путями. Такъ, самая теплота можетъ быть непосредственно дѣятелемъ разложенія, какъ напр. при образованіи жженой извести изъ известняка. Свѣтъ въ извѣстныхъ условіяхъ дѣйствуетъ такъ же, напр. при разложенія углекислаго газа въ листьяхъ растений или серебряныхъ солей на фотографической пластинкѣ. А открытіе щелочныхъ и щелочноземельныхъ металловъ, составляющее величайшую заслугу Дэви на поприщѣ химіи, было сдѣлано помощью разложенія ихъ окисей электрическимъ токомъ.

Съ другой стороны, соединенія, образовавшіяся съ поглощеніемъ теплоты, часто бываютъ подвержены самопроизвольному разложенію. Таковы многія сильно взрывчатые тѣла, напр. хлористый азотъ и окислы хлора.

226. Замѣщеніе одного элемента въ соединеніи другимъ представляетъ прекрасный примѣръ разсѣянія энергіи. Теплота соединенія іода съ водородомъ или другими металлами меньше, чѣмъ хлора съ тѣми же металлами, и вслѣдствіе этого хлоръ обладаетъ способностью разлагать подобныя іодистыя соединенія, выдѣляя свободный іодъ. Однако, эта область предмета въ цѣломъ легче изслѣдуется, если энергію, выдѣляемую въ процессѣ пре-

вращенія, измѣрять въ электрической формѣ, вмѣсто тепловой; такъ что эта область, поскольку она не касается химіи, относится скорѣе къ электричеству, нежели къ теплотѣ.

Хотя всѣ соединенія происходятъ согласно законамъ энергій, но эти законы сами по себѣ не даютъ намъ возможности предвидѣть результатъ въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ. Мы должны имѣть отдѣльныя данныя по отношенію къ каждой парѣ веществъ, входящихъ въ разсмотрѣніе—данныя, которыя, конечно, могутъ быть найдены только опытомъ. Такъ какъ онѣ гораздо болѣе относятся къ химіи, нежели къ теплотѣ, то мы и не можемъ входить въ подробности, но приведемъ изъ одной части этого обширнаго предмета, въ видѣ примѣровъ, нѣсколько общихъ результатовъ, какъ они даны Бертело.

Когда *сильныя кислоты и сильныя основанія*, растворенныя предварительно въ достаточномъ количествѣ воды, соединяясь другъ съ другомъ въ эквивалентныхъ отношеніяхъ, образуютъ прочныя среднія соли, то развиваются почти одинаковыя количества теплоты, каковы бы ни были кислота и основаніе.

Количество развивающейся теплоты лишь очень мало измѣняется присутствіемъ большихъ количествъ воды или избытка того же самаго или другого основанія.

Примѣрами можетъ служить образованіе среднихъ солей изъ натра, кали, барита и др. и кислотъ хлористоводородной, азотной, сѣрной и др.

При образованіи соли изъ щелочи и сильной кислоты выдѣляется больше теплоты, чѣмъ при соединеніи *слабой* кислоты съ тою же самою щелочью.

Слабыя кислоты образуютъ даже съ самыми сильны-

ми основаніями соли, которыя разлагаются водою тѣмъ въ большей степени, чѣмъ больше количество воды; но разложеніе водою тѣмъ слабѣе, чѣмъ больше наличный избытокъ кислоты или основанія.

Разложеніе вслѣдствіе прибавленія воды идетъ безгранично въ случаѣ солей нѣкоторыхъ слабыхъ кислотъ; при другихъ оно стремится къ опредѣленному предѣлу. Но есть примѣры, въ которыхъ уже умѣренное количество воды производитъ полное разложеніе, такъ что дѣйствіе на термометръ почти въ точности обратно тому, какое наблюдается при образованіи соли.

227. Для иллюстраціи частью того, что сказано было выше, частью нѣсколькихъ дальнѣйшихъ замѣчаній, мы приводимъ таблицу, содержащую приблизительныя

Теплоты соединенія.

H_2 съ O	. . .	68000	. . .	34000
H_2 съ O_2	. . .	45000	. . .	22500
C съ O	. . .	30000	. . .	2500
C съ O_2	. . .	97000	. . .	8100
CO съ O	. . .	67000	. . .	2400

Первый столбецъ указываетъ соединяющіяся вещества и отношенія, въ которыхъ они соединяются. Здѣсь знаки H , O , C обозначаютъ «атомы» (не «молекулы») водорода, кислорода и углерода въ химическомъ смыслѣ слова, такъ что относительныя массы ихъ суть 1, 16 и 12. Второй столбецъ даетъ число единицъ теплоты (§ 179), развиваемое при образованіи указанныхъ кислородныхъ соединеній 2 фунтами водорода, 12 ф. угля или 28 ф. окиси углерода. Числа третьяго столбца указываютъ, сколько единицъ теплоты выделяется на каждый фунтъ

вещества при его окисленіи ¹⁾.—Сущность процессовъ, которыми получены эти числа, состоитъ въ томъ, что продуктъ соединенія приводится къ той же самой (обыкновенной) температурѣ, какую имѣли составныя части, и выделяемая при этомъ теплота прибавляется къ той, которая развивается вслѣдствіе химическаго соединенія.

Такимъ образомъ, при окисленіи фунта водорода въ 9 ф. воды выделяется 34000 единицъ тепла. Если бы то же количество водорода было прямо окислено до перекиси, то выделилось бы только 22500 единицъ. Поэтому для дальнѣйшаго окисленія 9 фунтовъ воды потребно количество энергіи эквивалентное разности этихъ чиселъ, т. е. 11500 тепловымъ единицамъ.

Мы видимъ также, что число единицъ теплоты, освобождаемое при окисленіи данного количества угля непосредственно въ углекислый газъ, равняется суммѣ чиселъ, соответствующихъ двумъ стадіямъ: образованію окиси углерода и дальнѣйшему ея окисленію въ углекислый газъ.

228. Многія тѣла, склонныя даже къ энергическому соединенію, не соединяются при обыкновенной температурѣ. Такъ, даже взрывчатая смѣсь одного объема кислорода съ двумя объемами водорода требуетъ какого-либо предварительнаго толчка. Если малѣйшая часть смѣси будетъ нагрѣта до надлежащей температуры (пламенемъ спички или электрической искрой), то теплоты, развивающейся при соединеніи, будетъ достаточно, чтобы въ надлежащей мѣрѣ повысить температуру сосѣднихъ

¹⁾ Числа таблицы останутся тѣ же, если единица теплоты относится къ килограмму: должно лишь всадѣ брать «килограммъ» вмѣсто «фунта».

частей смѣси, которыя въ свою очередь загораются. Въ настоящее время еще неизвѣстно въ точности, почему струя водорода загорается (на воздухѣ) въ соприкосновеніи съ губчатой платиной. Возможно, что это обусловливается теплотою, развивающеюся при внезапномъ сгущеніи; въ такомъ случаѣ мы имѣли бы явленіе того же рода, какъ только что названное. Но оно можетъ обусловливаться и простымъ сближеніемъ частицъ кислорода и водорода вслѣдствіе поверхностнаго сгущенія.

229. Мы подготовлены теперь къ разсмотрѣнію нѣкоторыхъ важнѣйшихъ явленій обыкновеннаго горѣнія. Наша таблица (§ 227), какъ она ни скудна, показываетъ, какъ велики количества теплоты, развивающіяся при нѣкоторыхъ обыкновеннѣйшихъ случаяхъ соединенія. Когда газообразные продукты соединенія нагрѣваются настолько, что становятся самосвѣтящимися, тогда они образуютъ то, что называется *пламенемъ*. Разсмотримъ одинъ случай съ нѣкоторыми подробностями.

230. Прекрасный и типическій примѣръ, тщательно изученный Девиллемъ, представляетъ пламя паяльной лампы, образованное смѣсью кислорода и окиси углерода: газы вытекаютъ изъ отверстія площадью въ $\frac{1}{120}$ квадратдюйма подъ давленіемъ полудюйма или дюйма воды. Самое пламя состоитъ изъ наружнаго конуса, отъ трехъ до четырехъ дюймовъ длины, котораго нижнія части имѣютъ яркій синій цвѣтъ, а вершина — слабо желтый. Внутри этого конуса находится другой, длиною только въ полдюйма, состоящій изъ негорѣвшаго еще газа. Какъ разъ у вершины внутренняго конуса, гдѣ горѣніе газовъ только что *начинается*, пламя имѣетъ наивысшую температуру: въ этомъ мѣстѣ легко плавится даже толстая платиновая проволока. Температура пламени бы-

стро падаетъ по направленію кверху. [Скорость распространения температуры соединенія (см. выноски § 221), очевидно, равняется скорости струи газа у вершины внутреннего конуса].

Для опредѣленія состава свѣтящей матеріи въ данной точкѣ на оси пламени Девилль употреблялъ тонкую серебряную трубочку, діаметромъ около $\frac{1}{16}$ дюйма, которая постоянно охлаждалась струею протекавшей по ней холодной воды. Эта трубочка устанавливалась поперекъ пламени такимъ образомъ, чтобы маленькое отверстіе (въ $\frac{1}{12}$ дюйма діаметромъ), сдѣланное въ ея стѣнкѣ, приходилось въ требуемой точкѣ на оси пламени, и чтобы струя газа прямо ударила въ отверстіе. Холодная вода пропускалась по трубочкѣ настолько быстро, что чрезъ маленькое отверстіе происходило всасываніе. Такимъ образомъ струя воды увлекала пробу газовъ изъ пламени. Газы пропускались по выходѣ изъ воды чрезъ бѣдокое кали для удержанія нерастворившейся углекислоты, и затѣмъ производился тщательный анализъ ихъ. Чтобы узнать, изъ какого количества первоначальной (несторѣвшейся) смѣси произошли полученные продукты, экспериментаторъ предварительно прибавлялъ къ смѣси опредѣленное (небольшое) количество азота. Азотъ, конечно, проходилъ въ назначенный для собиранія газовъ сосудъ почти цѣликомъ, такъ какъ единственная незначительная потеря происходила только путемъ диффузіи чрезъ пламя.

Много согласныхъ между собою опредѣленій, сдѣланныхъ этимъ способомъ, показали, что вершина пламени содержитъ почти исключительно углекислый газъ (предполагая, конечно, что первоначальная горючая смѣсь составлена изъ газовъ въ надлежащемъ отношеніи). Но

отъ вершины книзу отношеніе количества свободныхъ газовъ къ количеству соединенныхъ постоянно возрастало, и у вершины внутренняго конуса (въ мѣстѣ наивысшей температуры) количество свободныхъ газовъ составляло около $\frac{1}{3}$ всей смѣси. Съ перваго взгляда такой результатъ кажется нѣсколько страннымъ; но не трудно найти ему объясненіе. Должно лишь принять въ расчетъ диссоціацію (§ 47), обуславливаемую высокой температурой.

231. О диссоціаціи мы сдѣлаемъ съ теоретической точки зрѣнія нѣсколько замѣчаній дальше. Пока же мы можемъ въ общихъ чертахъ сравнить законы диссоціаціи съ законами испаренія. Мы видѣли, что жидкость при опредѣленной температурѣ находится на своей свободной поверхности въ кинетическомъ (подвижномъ) равновѣсіи съ собственнымъ паромъ при опредѣленномъ давленіи (§ 162), такъ что на общей имъ границѣ происходитъ постоянное ступеніе, сопровождающееся одинаково быстрымъ испареніемъ; на ряду съ этимъ идетъ постоянное выдѣленіе и поглощеніе теплоты.

Точно такъ и въ сложномъ газѣ, по крайней мѣрѣ при какой-либо температурѣ, взятой въ *известныхъ предѣлахъ* (эти предѣлы зависятъ, вѣроятно, и отъ давленія), существуетъ кинетическое равновѣсіе вслѣдствіе того, что съ одной стороны происходитъ постоянная диссоціація, съ другой—обратное соединеніе, возмѣщающее диссоціацію; вмѣстѣ съ тѣмъ совершается постоянное поглощеніе и выдѣленіе теплоты, теплоты химическаго соединенія. Процентное количество цѣлаго, подвергающееся диссоціаціи, возрастаетъ отъ нуля при низшей границѣ температуръ (той температурѣ, при которой и ниже которой нѣтъ диссоціаціи) быстрѣе и

быстрѣ, пока не достигнетъ приблизительно половины тѣлаго; послѣ этого оно возрастаетъ все болѣе и болѣе медленно вплоть до высшей границы (той температуры, при которой и выше которой все соединеніе диссоціровано). Та промежуточная температура, при которой диссоцірована половина всего количества газа, называется «температурой диссоціаціи».

Когда газовая смѣсь подвергается постепенному нагреванію, то соединеніе газовъ *не можетъ начаться* прежде, чѣмъ будетъ достигнута опредѣленная температура, которая (не выясненнымъ еще образомъ) зависитъ отъ составныхъ частей и ихъ количественнаго отношенія. Отсюда мы видимъ, *отчего* взрывчатая смѣсь (§ 228) требуетъ предварительнаго «толчка». Если составныя части таковы, что могутъ прямо соединяться съ выдѣленіемъ теплоты, то соединеніе, разъ начавшись, производитъ достаточное повышеніе температуры для того, чтобы произошло дальнѣйшее соединеніе. Процессъ продолжается (предполагая, что газъ не передаетъ энергіи внѣшнимъ тѣламъ) до тѣхъ поръ, пока не установится кинетическое равновѣсіе, т. е. пока процентное количество соединившихся газовъ не будетъ соответствовать температурѣ, которой достигла вся смѣсь вслѣдствіе выдѣленной при соединеніи теплоты. Если же дать газу потерять нѣкоторое количество энергіи, напр. посредствомъ соприкосновенія съ холоднымъ сосудомъ или путемъ расширенія и произведенія работы, то процессъ соединенія будетъ продолжаться и можетъ дойти до конца; въ этомъ случаѣ окончательная температура должна быть ниже, чѣмъ низшая предѣльная температура диссоціаціи.

Нѣчто подобное произойдетъ и въ томъ случаѣ, если

оба газа, каждый отдельно, сперва нагрѣть до высшей предѣльной температуры и, смѣшавъ ихъ, мало-по-малу понижать температуру смѣси.

232. *Содержаніе* §§ 220—231. Различные способы соединенія. Тепло и холодъ при смѣшиваніи. Прямые слѣдствія законовъ термодинамики. Прочность соединеній. Замѣщеніе. Теплота соединенія. Горѣніе. Строеніе пламени. Диссоціація.

ГЛАВА XIV.

Проводимость теплоты.

233. См. §§ 4, 73. Мы уже видѣли, что тѣла, находящіеся въ соприкосновеніи, окончательно принимаютъ одну и ту же температуру. Этотъ опытный фактъ составляетъ необходимое основаніе почти всѣхъ нашихъ методовъ измѣренія температуры. То же самое происходитъ, конечно, и между смежными частями одного и того же тѣла. Выравниваніе температуры можетъ происходить только путемъ передачи теплоты отъ одной части тѣла къ другой. Въ настоящее время намъ нѣтъ надобности задаваться вопросомъ, производится-ли это выравниваніе исключительно вслѣдствіе перехода теплоты отъ болѣе теплыхъ частей къ болѣе холоднымъ, или же происходитъ взаимный обмѣнъ, при которомъ теплыя части передаютъ холоднымъ больше теплоты, чѣмъ сами отъ нихъ получаютъ. По отношенію къ окончательному результату все равно, которая изъ этихъ точекъ зрѣнія справедлива, ибо мы не можемъ доказать, что имѣемъ дѣло именно съ тою, а не другою частью энергіи; но теоретически вопросъ очень интересенъ и важенъ, какъ

мы увидимъ, когда дойдемъ до *лучеиспусканія*. Къ той же главѣ мы отнесемъ всѣ явленія *непосредственной* передачи теплоты между частями тѣла, находящимися на конечныхъ разстояніяхъ другъ отъ друга.

234. Каждый знаетъ изъ обыденнаго наблюденія, что тѣла очень различаются по способности проводить теплоту. Мы безъ затрудненія держимъ въ рукѣ одинъ конецъ короткаго куска стекла, даже если другой конецъ его будетъ расплавленъ въ пламени наэльной лампы. Никто не рѣшился-бы сдѣлать подобный опытъ съ такимъ же кускомъ мѣди или желѣза. Деревянные или костяные вставки въ ручкѣ металлическаго чайника дѣлаются благодаря знанію того же факта.

Мы приведемъ здѣсь еще двѣ обыкновенныя лекціонныя формы опыта.

Первый опытъ принадлежитъ Ингенгоузу. Берутъ металлическій сосудъ, въ переднюю стѣнку котораго вставлено нѣсколько палочекъ одинаковой толщины, но изъ различнаго матеріала (рис. 41). Палочки покрыты

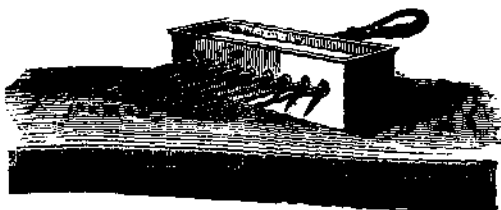


Рис. 41.

тонкимъ слоемъ воска, который плавится, лишь только будетъ нагрѣтъ до надлежащей температуры. Положимъ, что всѣ части прибора были при температурѣ окружающаго воздуха и что въ сосудъ сразу налита горячая

вода. Замѣчая границу, до которой расплавится воскъ, мы можемъ судить объ относительной *термометрической* проводимости различныхъ материаловъ, изъ которыхъ сдѣланы палочки.

Другая форма опыта, противъ которой можно меньше возразить, состоитъ въ томъ, что берутъ два бруска, желѣзный и мѣдный, одинаковаго поперечнаго сѣченія, приклеиваютъ къ нижней ихъ поверхности воскомъ нѣсколько маленькихъ шариковъ и, установивъ бруски концами другъ къ другу, помѣщаютъ какъ разъ посрединѣ пламя лампы (рис. 42). Оказывается, что темпе-

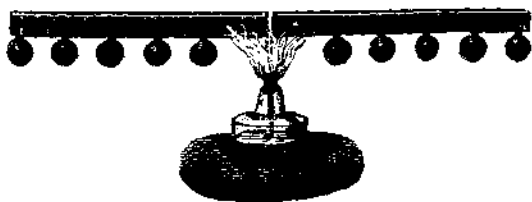


Рис. 42.

ратура, при которой воскъ размягчается настолько, что шарики отпадаютъ, перемѣщается гораздо скорѣе вдоль мѣди, нежели вдоль желѣза. И здѣсь это дѣйствительно указываетъ на большую проводимость мѣди, такъ какъ объемныя теплоемкости ¹⁾ желѣза и мѣди не очень различны.

¹⁾ Теплоемкости единицы объема. См. выноски § 183, а также табл. § 184.

[Нельзя не упомянуть о слѣдующей еще болѣе простой формѣ того же опыта. Два одинаковыхъ по размѣрамъ куска мѣдной и желѣзной проволоки вставляются заостренными концами въ восковой огарокъ; свободные концы проволокъ сводятся вмѣстѣ и вносятся въ пламя спиртовой лампочки. Тогда можно будетъ

235. Нѣсколько хорошихъ работъ по этому предмету было произведено въ прошломъ столѣтіи Ламбертомъ. Но первый, давшій вполнѣ удовлетворительное опредѣленіе проводящей способности, или *теплопроводимости*, былъ Фурье. Можно сказать, что все содержаніе настоящей главы, за исключеніемъ лишь позднѣйшей экспериментальной разработки его, создано Фурье въ его *Théorie Analytique de la Chaleur*, сочиненіи, опубликованномъ въ законченной формѣ въ 1822 году; оно же дало толчекъ къ дальнѣйшей разработкѣ предмета или сдѣлало ее возможною. Чрезвычайно оригинальные методы этого изслѣдованія явились источникомъ вдохновенія нѣкоторыхъ величайшихъ математиковъ; и приложеніе одной изъ его простѣйшихъ частей къ проведенію электричества прославило Ома. Боле того, въ сочиненіи Фурье впервые было обращено особое вниманіе на *измѣренія* физическихъ величинъ въ зависимости отъ основныхъ единицъ — предметъ чрезвычайно важный [См. главу XIX].

236. Проводящая способность должна *при прочихъ равныхъ условіяхъ* измѣряться количествомъ проходящей теплоты. Мы, слѣдовательно, должны найти способъ опредѣлять количество теплоты, проходящей отъ одной части тѣла къ другой, и найти тѣ условія, которыя при этомъ оказываютъ вліяніе. Тогда мы можемъ поставить два различныхъ тѣла въ одни и тѣ же опредѣленные условія и сравнить ихъ проводимости, сравнивая количества пропущенной ими теплоты.

видѣть, что мѣдная проволока выпадетъ изъ воскового огарка гораздо скорѣе, чѣмъ желѣзная. См. *Общедоступные физическіе* ... Г. Дубровскаго, Спб. 1893].

Зам. р. перев.

237. Простѣйшій случай есть тотъ, когда теплота проходить чрезъ все тѣло по параллельнымъ линіямъ. Такъ напр. ледъ, равномернымъ слоемъ покрывающій озеро, утолщается мало-по-малу, если температура воздуха ниже точки замерзанія. Это обусловливается переходомъ теплоты сквозь ледъ отъ воды, непосредственно лежащей подъ нимъ, къ верхней поверхности льда, которая остается постоянно болѣе холодною, чѣмъ нижняя. Оттого близъ лежащій слой воды замерзаетъ. И такъ какъ температура одинакова въ каждомъ изъ горизонтальныхъ слоевъ, какъ воды, такъ и льда, то переходъ теплоты совершается перпендикулярно этимъ слоямъ, т. е. вертикально вверхъ.

Отсюда типичною формой проводящаго твердаго тѣла мы беремъ пластинку однообразной толщины и (практически) безконечно большой поверхности; обѣ стороны ея постоянно удерживаются при двухъ различныхъ температурахъ. По истеченіи нѣкотораго времени, которое теоретически безконечно, но на дѣлѣ вообще невелико, во всей массѣ пластинки будетъ достигнуто нѣкоторое постоянное распредѣленіе температуры, такъ что каждый слой будетъ отдавать столько же теплоты, сколько получаетъ. Если при такихъ условіяхъ мы измѣримъ количество теплоты, проходящей чрезъ квадратный дюймъ, футъ или ярдъ какого-либо слоя пластинки въ теченіе минуты, то полученные результаты мы можемъ разсматривать, какъ численное выраженіе проводящей способности. Для сравненія пластинокъ изъ различныхъ веществъ мы, конечно, должны брать пластинки одинаковой толщины и одинаковую разность температуръ для ея сторонъ.

Мы приходимъ такимъ образомъ къ слѣдующему опредѣленію:

Теплопроводимость тѣла при нѣкоторой температурѣ есть число единицъ теплоты, проходящей въ единицу времени чрезъ единицу поверхности сквозь безконечную пластинку (или слой) вещества единичной толщины, если обѣ ея стороны удерживаются при температурахъ на полградуса выше и на полградуса ниже данной температуры.

Употребляемыя нами единицы, какъ и до сихъ поръ, суть футъ, минута, фунтъ и градусъ стоградуснаго термометра. Въ особой главѣ (XIX) будетъ показано, какимъ образомъ дѣлается переходъ къ какой-либо другой системѣ единицъ. [Замѣтимъ, что теплопроводимость, на основаніи даннаго выше опредѣленія, можетъ зависѣть отъ температуры тѣла. Это будетъ разсмотрѣно ниже].

238. Методы, которые главнымъ образомъ употребляются для измѣренія теплопроводимости, основаны въ сущности на наблюденіи температуры проводящаго тѣла въ различныхъ его частяхъ. Такъ, количество теплоты, которое проходитъ чрезъ какую-либо площадь въ тѣлѣ—одна изъ величинъ, входящихъ въ опредѣленіе теплопроводимости—выводится изъ того измѣненія температуры, которое оно производитъ въ самомъ тѣлѣ. Но повышение температуры, производимое даннымъ количествомъ теплоты въ данномъ объемѣ тѣла, обратно пропорціонально его объемной теплоемкости (см. выноски § 183). Поэтому изъ такого рода опытовъ мы выводимъ не самую теплопроводимость, опредѣленную какъ выше, а ея отношеніе къ объемной теплоемкости тѣла. [Это отношеніе Максвеллъ называлъ *термометрическою про-*

водимостью, а Томсонъ — *тепловой диффузивностью* вещества]. Следовательно, опредѣленіе теплопроводимости этими методами требуетъ отдѣльнаго ряда опытовъ для опредѣленія удѣльнаго вѣса и удѣльной теплоты.

239. Теперь представимъ себѣ тепловое состояніе во внутренности бруска, когда чрезъ него проходитъ постоянный токъ теплоты. Единственная причина передвиженія теплоты состоитъ въ томъ, что каждый слой имѣетъ *другую температуру*, чѣмъ сосѣдній. И такъ какъ чрезъ каждый (тонкій) слой проходитъ одинаковое количество теплоты, то разность температуръ на обѣихъ сторонахъ такого слоя должна быть пропорціональна его толщинѣ. [Это легко видѣть, представивъ себѣ слой раздѣленнымъ на много болѣе тонкихъ слоевъ одинаковой толщины и рассматривая затѣмъ два, три или болѣе сосѣднихъ слоя, какъ одинъ]. Такимъ образомъ количество теплоты, проходящее чрезъ какой-нибудь слой, зависить *при прочихъ равныхъ условіяхъ* отъ *паденія температуры* (*gradient of temperature*) перпендикулярно слою. Это «паденіе» можетъ съ выгодною замѣнить разность температуръ двухъ сторонъ слоя единичной толщины. Ибо мы имѣемъ тогда средство вычислять количество теплоты, проходящей чрезъ какой-нибудь слой даже въ случаѣ измѣняющагося состоянія температуры, напримѣръ, когда одна сторона пластинки поддерживается при постоянной температурѣ, а другая попеременно нагревается и охлаждается.

240. Всѣ имѣющіеся по сіе время опытные результаты согласуются съ предположеніемъ, которое очевидно должно быть вѣрно для малыхъ паденій температуры, что количество теплоты, проходящее чрезъ какой-нибудь слой при данной температурѣ, прямо пропорціо-

нально паденію температуры перпендикулярно слою. [Необходимо отмѣтить, что распространеніе этого на большія паденія есть *допущеніе*, стоящее въ согласіи съ фактами, ибо проводимость вообще измѣряется въ условіяхъ, при которыхъ паденіе гораздо болѣе, чѣмъ 1° С на футъ, т. е. чѣмъ то, которое содержится въ нашемъ опредѣленіи. И мы не можемъ еще утверждать, что количество теплоты, которое проходило бы чрезъ пластинку толщиной въ миллионную долю фута, ровно въ миллионъ разъ болѣе того, какое проходитъ чрезъ пластинку толщиной въ одинъ футъ при тѣхъ же самыхъ температурахъ обѣихъ поверхностей, даже если бы проводимость матеріала была одинакова при всѣхъ температурахъ. Соответственное предложеніе по отношенію къ электропроводности (которое называется закономъ Ома, хотя прямо основано на блестящемъ трудѣ Фурье) содержитъ то же допущеніе, но здѣсь мы гораздо легче можемъ его провѣрить; эту провѣрку въ широкихъ предѣлахъ сдѣлали Максвелль и Кристалъ (Chrystal)].

241. На опытѣ невозможно осуществить тѣхъ простыхъ условій, которыя подразумѣваются въ данномъ выше опредѣленіи теплопроводности. Поэтому для измѣренія ея величины въ различныхъ веществахъ требуются нѣсколько болѣе сложные экспериментальные приспособленія.

Въ основаніе опыта положены были два главныхъ начала. Первое требуетъ неизмѣннаго состоянія температуры и вслѣдствіе этого постояннаго тока теплоты. Второе требуетъ измѣняющагося, но по существу періодическаго состоянія температуры, которое поддерживается внѣшними причинами въ одной части тѣла и распространяется отсюда нѣкотораго рода волною. Въ

обоихъ случаяхъ мы вычисляемъ, въ зависимости отъ (извѣстныхъ) паденій температуры и (неизвѣстной) проводимости, избытокъ теплоты, доставляемой данной части тѣла посредствомъ проводимости, надъ теплотою, отдаваемою путемъ того же процесса. Если температура остается постоянною, то рассматриваемая часть тѣла должна терять теплоту еще какъ-либо иначе, чѣмъ путемъ проводимости; въ противномъ случаѣ температура должна повышаться. При первомъ способѣ каждая часть тѣла удерживаетъ постоянную температуру, и мы должны поэтому измѣрить какимъ-либо независимымъ путемъ то количество теплоты, которое теряется данною частью тѣла помимо отдаваемого вслѣдствіе проводимости. При второмъ способѣ мы приравниваемъ названный выше избытокъ теплоты, обусловливаемый проводимостью, тому количеству теплоты, которое указывается объемною теплоемкостью элемента тѣла и измѣненіемъ его температуры. — Третій, до нѣкоторой степени знаменитый методъ опирается на оба эти соображенія.

242. Первый методъ въ несовершенной формѣ былъ примѣненъ Ламбертомъ, но затѣмъ очень усовершенствованъ Форбсомъ, который этимъ путемъ получилъ первое абсолютное опредѣленіе проводимости сколько нибудь пригоднаго значенія. Принципъ самаго способа крайне простъ; но производство опыта и подробности вычисленія результата очень трудны.

Длинный брусокъ равномернаго поперечнаго сѣченія нагрѣвается съ одного конца до опредѣленной высокой температуры и удерживается при этой температурѣ, а остальная часть бруска выставлена прямо на воздухъ лабораторіи. Въ брускѣ чрезъ правильные промежутки сдѣланы маленькія углубленія; въ нихъ (если брусокъ

не желѣзный) вставляются желѣзныя чашечки, въ которыя и помѣщаются цилиндрическіе резервуары точныхъ термометровъ: каждый резервуаръ окружается нѣсколькими каплями ртути. [Найдено вычисленіемъ, основаннымъ на самомъ же опытѣ, что эти углубленія не препятствуютъ сколько-нибудь замѣтнымъ образомъ прохожденію теплоты вдоль бруска].

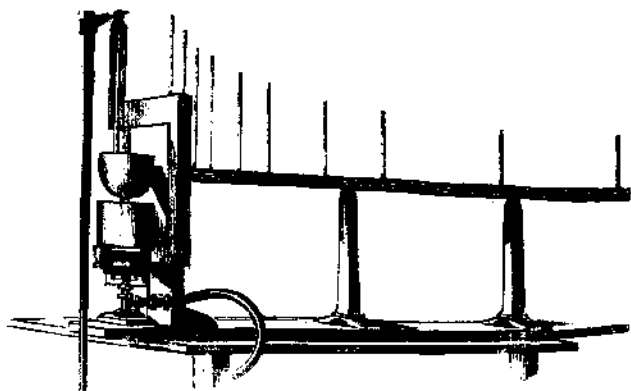


Рис. 43.

Вблизи этого бруска помѣщается другой изъ того же матеріала и такого же сѣченія, но гораздо болѣе короткій, снабженный тоже вставленнымъ въ него термометромъ.

Бруски оставляются, положимъ, на всю ночь въ лабораторіи безъ сообщенія имъ тепла. Они будутъ тогда имѣть повсемѣстно одну и ту же температуру, температуру воздуха, и всѣ термометры будутъ указывать эту температуру. Теперь положимъ, что одинъ конецъ длиннаго бруска нагревается. [Для этого обыкновенно помѣщаютъ этотъ конецъ въ ванну изъ оловяннаго припоя

или свинца, удерживаемаго при постоянной температурѣ посредствомъ регулятора газа]. Черезъ короткое время термометръ ближайшій къ источнику теплоты начинаетъ повышаться; затѣмъ повышается все быстрѣе и быстрѣе. Тѣмъ временемъ начинаетъ повышаться и слѣдующій термометръ. И т. д. Въ желѣзномъ брускѣ, который употреблялъ Форбсъ и который имѣлъ 8 футовъ длины и около $1\frac{1}{4}$ кв. дюйма сѣченія, температуры устанавливались окончательно лишь по прошествіи 6—8 часовъ. Когда это постоянное состояніе было достигнуто (т. е. когда въ теченіе получаса или болѣе не замѣчалось измѣненій въ отчетѣ термометровъ), тогда оказывалось, что даже наиболѣе удаленный отъ источника теплоты термометръ указывалъ температуру замѣтно высшую, чѣмъ температура воздуха комнаты: эту послѣднюю можно было видѣть по термометру короткаго бруска. Остальные термометры показывали повышение температуры, возрастающее все болѣе и болѣе быстро по мѣрѣ приближенія къ источнику тепла. [Проводимость мѣди настолько больше, чѣмъ желѣза, что удаленный конецъ восьмифутаго мѣднаго бруска должно было охлаждать посредствомъ помѣщенія его въ сосудъ, въ который снизу постоянно притекала струя воды]. Ясно, что изъ этого опыта, повтореннаго, если нужно, при различныхъ температурахъ теплого источника, мы можемъ очень точно найти то распредѣленіе температуры вдоль оси бруска, какое достигается въ состояніи равновѣсія. [Вычисленіе по способу Фурье показываетъ, что температуру можно считать одинаковою на протяженіи одного и того же сѣченія бруска, если только оно не очень велико, или если теплопроводимость матеріала не очень мала].

243. До сихъ поръ изслѣдованіе касалось только температуръ; теперь мы должны обратить вниманіе на самую теплоту. Количество теплоты, проходящей въ минуту чрезъ какое-либо поперечное сѣченіе бруска, очевидно, выражается произведеніемъ изъ площади сѣченія, проводимости (§ 237) и паденія температуры (§ 239). Паденіе, конечно, можетъ быть вычислено изъ наблюдаемаго распредѣленія температуры, а площадь поперечнаго сѣченія извѣстна. Такимъ образомъ количество проходящей теплоты выражается нѣкоторымъ кратнымъ отъ неизвѣстной проводимости. Но эта теплота не повышаетъ температуру той части бруска, чрезъ которую проходитъ, ибо мы предположили, что стаціонарное состояніе уже достигнуто. Слѣдовательно, осталъная часть бруска, по ту сторону даннаго сѣченія, должна терять вслѣдствіе охлажденія въ воздухѣ (а въ случаѣ мѣднаго бруска также и въ водяной ваннѣ на концѣ) точно такое же количество теплоты, какое она пріобрѣтаетъ путемъ проводимости. Остается только найти, какъ велико теряемое такимъ образомъ количество теплоты, и мы прямо получимъ опредѣленіе проводимости бруска *при температурѣ даннаго поперечнаго сѣченія*. [Слова, напечатанныя курсивомъ, заслуживаютъ особеннаго вниманія, такъ какъ они указываютъ на одно изъ важнѣйшихъ слѣдствій изъ усовершенствованій, сдѣланныхъ Форбсомъ, которыя мы теперь и опишемъ].

244. Начавъ съизнова, мы *разъ на всегда* нагрѣваемъ короткій брусокъ до высокой температуры, вставляемъ термометръ и даемъ охлаждаться по соедѣству съ длиннымъ брускомъ (который въ этомъ опытѣ остается при температурѣ воздуха). Термометръ короткаго бруска те-

перь отчитывается *через совершенно равные промежутки времени*, положимъ, *через полминуты* пока брусокъ очень горячъ и охлаждается быстро, потомъ *через минуту*, *через пять минутъ* и *подъ конецъ* каждые полчаса, до тѣхъ поръ пока брусокъ не приметъ температуры воздуха. Отъ времени до времени отмѣчаются и показанія нѣкоторыхъ термометровъ длиннаго бруска. Изъ сказаннаго выше ясно, что этотъ опытъ дастъ намъ возможность вычислить, сколько теплоты теряется короткимъ брускомъ въ минуту на каждую единицу длины при каждой изъ температуръ въ предѣлахъ, взятыхъ для опыта; отсюда мы можемъ вычислить, какъ велика потеря теплоты въ каждой данной части длиннаго бруска въ первомъ опытѣ, такъ какъ намъ извѣстно распределение температуры въ брускѣ въ стационарномъ состояніи.

245. Потеря теплоты охлажденіемъ зависитъ главнымъ образомъ отъ избытка температуры бруска надъ температурою воздуха; въ виду опредѣленія послѣдней и употребляются въ каждой части опыта два бруска. Но она до нѣкоторой степени зависитъ также отъ наличной температуры воздуха и его давленія; поэтому обѣ части опыта должны производиться, по возможности, при одинаковой температурѣ воздуха и одинаковомъ атмосферномъ давленіи. (См. § 336).

246. Единица теплоты, въ которой выражается проводимость, получаемая прямымъ сравненіемъ результатовъ §§ 242 и 244, конечно, есть количество теплоты, возвышающее на 1°C температуру единицы объема вещества, изъ котораго сдѣланъ брусокъ. Вотъ результаты одного изъ опытовъ Форбса надъ желѣзомъ, выраженные этою единицею:

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ЖЕЛѢЗА.

Температура С.	0°	100°	200°
	0,01506	0,01140	0,00927

Съ перваго взгляда видно, что проводимость желѣза къ теплотѣ, какъ и его электропроводимость, уменьшается съ повышеніемъ температуры. Форбсъ и ожидалъ этого, такъ какъ замѣтилъ, что *порядокъ*, въ которомъ располагаются металлы, какъ проводники теплоты, тотъ же что и порядокъ ихъ, какъ проводниковъ электричества—а электрическая проводимость металловъ съ повышеніемъ температуры уменьшается. Замѣчаніе, сдѣланное Форбсомъ, вполне подтвердилось основательными опытами Видемана и Франца; но его дальнѣйшія ожиданія, какъ увидимъ, не оправдались.

Слѣдующіе результаты, выраженные въ той же самой или подобной ей единицѣ, получены Тэтомъ при повтореніи и распространеніи опытовъ Форбса (они произведены, какъ и опыты Форбса, при участіи *Британской Ассоціаціи*). Желѣзный брусокъ былъ тотъ же, который употреблялся Форбсомъ.

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ.

Температура С.	0°	100°	200°	300°	
Желѣзо	0,0149	0,0128	0,0114	0,0105	52,9(1+0,0014t)
Мѣдь, электрич. хор. качества .	0,076	0,079	0,082	0,085	53,4(1+0,00088t)
Мѣдь, электрич. дурн. качества.	0,054	0,057	0,060	0,063	52,5(1+0,0009t)
Нейзильберъ (German Silver). . .	0,0088	0,009	0,0092	0,0094	46,6(1+0,0009t)

Термометрическая проводимость всѣхъ тѣлъ этой таблицы, кромѣ желѣза, повидимому *увеличивается* съ повышеніемъ температуры.

Чтобы эти числа превратить въ числа, выражающія тепловую проводимость, опредѣленную какъ выше (§ 237), ихъ должно умножить на «приведенное къ водѣ» тепловое значеніе кубическаго фута соотвѣтственнаго вещества, т. е. на теплоемкость единицы объема вещества (§ 183). Эти значенія даны въ послѣднемъ столбцѣ таблицы. Измѣненія съ температурою, указываемыя множителемъ въ скобкахъ, весьма недостоверны.

Слѣдующая таблица содержитъ результаты Форбса вмѣстѣ съ нѣкоторыми новѣйшими опредѣленіями:

ТЕПЛОПРОВОДИМОСТЬ ЖЕЛѢЗА И МѢДИ.

Въ футахъ, минутахъ и градусахъ C[°].

Желѣзо.	Мѣдь.	
0,835 (1—0,00147t)		Форбсъ.
0,796 (1—0,00287t)	$\left\{ \begin{array}{l} 4,11 (1-0,00214t) \\ 3,9 (1-0,00152t) \end{array} \right\}$	Ангстрёмъ.
0,788 (1—0,00002t)	$\left\{ \begin{array}{l} 4,03 (1+0,0013t) \\ 2,84 (1+0,0014t) \end{array} \right\}$	Татъ.
0,666 (1—0,00023t)	2,88 (1+0,00004t)	Лоренцъ.
0,677 (1—0,002t)	2,04 (1+0,0057t)	Кирхгофъ.

247. Должно однако замѣтить, что Форбсъ, выводя свои окончательные результаты изъ данныхъ опыта, не принималъ въ расчетъ возрастанія удѣльной теплоты съ повышеніемъ температуры (§ 184). Ангстрёмъ по несчастью утверждаетъ, что эта причина можетъ имѣть лишь незначительное вліяніе на измѣненіе проводимости съ температурою, такъ что его числа тоже не исправлены въ этомъ смыслѣ. Между тѣмъ, удѣльная теплота

¹⁾ Если мы примемъ за единицы, вмѣсто фута и минуты, граммъ и секунду, то каждое изъ приводимыхъ здѣсь чиселъ надо еще умножить на особый множитель $\frac{1}{4,03}$ (см. § 347).

железа возрастаетъ приблизительно на 1%, на каждые 7°C, и принявъ это въ расчетъ, мы бы свели примѣрно до $\frac{1}{3}$ всей величины тѣ измѣненія проводимости, которыя даются Форбсомъ, и они оказались бы тогда (въ изслѣдованіяхъ столь тонкихъ и трудныхъ) лежащими въ предѣлахъ погрѣшностей опыта. Измѣненіе удѣльной теплоты было принято во вниманіе другими экспериментаторами, которыхъ результаты приведены выше. Такимъ образомъ оказывается, что хотя *порядокъ* металловъ, какъ проводниковъ теплоты, на дѣлѣ тотъ же, что и ихъ порядокъ, какъ проводниковъ электричества — дальнѣйшей аналогіи, которой искалъ Форбсъ, не существуетъ. Уменьшеніе электрической проводимости съ повышеніемъ температуры имѣетъ мѣсто для всѣхъ металловъ, и для всѣхъ приблизительно въ одинаковой степени. Наоборотъ, теплопроводимость (по крайней мѣрѣ, большинства металловъ) повидимому увеличивается съ повышеніемъ температуры.

Но было показано, что мѣдь электрически хорошаго качества обладаетъ высшею теплопроводимостью, нежели мѣдь электрически дурного качества. — Весь предметъ, поскольку дѣло касается экспериментальныхъ частныхъ случаевъ, находится еще въ неразработанномъ состояніи, какъ можно судить по предшествующимъ таблицамъ. Значительная доля разногласій, конечно, происходитъ отъ того, что матеріалы, подвергавшіеся изслѣдованію, различались не только по химическому составу, но и физически, т. е. были литые, плющенные, тянутые, отожженные и т. д.

248. Приемъ, употребленный Ангстрёмомъ, есть смѣшанный методъ, упомянутый въ § 241. Онъ состоитъ въ поперебѣнномъ нагреваніи и охлажденіи, чрезъ опре-

дѣленные промежутки времени и на определенное число градусовъ, одного конца бруска, который тогда не долженъ быть столь длиннымъ, какъ при способѣ Форбса. Это періодическое измѣненіе продолжаютъ до тѣхъ поръ, пока показанія каждаго изъ термометровъ въ различныхъ частяхъ бруска тоже не сдѣлаются совершенно періодическими или, по крайней мѣрѣ, достаточно близкими къ періодическимъ. Методъ Фурье, приложенный къ этой задачѣ, показываетъ, что (по крайней мѣрѣ въ случаѣ, если проводимость и удѣльная теплота не измѣняются съ температурою) можно прямо вычислить проводимость изъ быстроты уменьшенія амплитуды послѣдовательныхъ термометровъ и запаздыванія ихъ наибольшей температуры на единицу длины бруска—совершенно независимо отъ быстроты потери теплоты поверхностью бруска (предполагая, что потеря всегда пропорціональна избытку температуры бруска надъ температурою воздуха). Мы не можемъ дать здѣсь подробностей вычисленія, но общее понятіе о его сущности можно составить себѣ изъ рѣшенія одной частной задачи, которое приводится въ слѣдующемъ §; математическая часть этого § можетъ быть опущена читателемъ безъ нарушенія связи въ нашемъ изложеніи.

249. Съ рассматриваемою частью нашего предмета связаны два чрезвычайно важныхъ вопроса:

1) Какимъ образомъ внутренняя теплота земли вліяетъ (путемъ проводимости) на температуру вблизи поверхности?

2) Какъ далеко и по какому закону проникаютъ въ земную кору суточные и годовыя колебанія температуры?

Второй вопросъ, очевидно, содержитъ задачу нѣ-

сколько сходную съ той, какая представляется въ методѣ Ангстрёма, разсмотрѣнномъ выше. И оба вопроса доставляютъ намъ весьма простые примѣры приложенія прекраснаго метода Фурье.

Пока мы ограничиваемся разсмотрѣніемъ только верхнихъ слоевъ земной коры, мы можемъ считать ихъ плоскими, а ихъ температуру зависящею только отъ глубины—теплота будетъ, слѣдовательно, проходить по параллельнымъ (вертикальнымъ) линіямъ. Это весьма упрощаетъ изслѣдованіе.

Пусть v —температура на глубинѣ x отъ земной поверхности. Тогда паденіе температуры есть dv/dx . Слѣдовательно, количество теплоты, проходящее вверхъ чрезъ горизонтальную площадь въ одинъ квадратный футъ въ единицу времени, на глубинѣ x есть kdv/dx , гдѣ k —проводимость при температурѣ v . Для глубины $x+\delta x$ подъ поверхностью это будетъ

$$k \frac{dv}{dx} + \frac{d}{dx} \left(k \frac{dv}{dx} \right) \delta x.$$

Избытокъ второго надъ первымъ показываетъ количество теплоты, которое (въ общемъ) было сообщено въ единицу времени слою въ одинъ квадратный футъ и толщиною δx .

Быстрота, съ какою повышается температура слоя (повышеніе температуры слоя въ единицу времени), есть dv/dt ; слѣдовательно, если c есть объемная теплоемкость (§ 183) коры, мы получаемъ еще другое выраженіе для количества теплоты, сообщаемого въ единицу времени квадратному футу слоя, котораго толщина δx , именно

$$c \frac{dv}{dt} \delta x.$$

Приравнивая выражения для одного и того же количества теплоты, полученныя независимо другъ отъ друга, мы имѣемъ окончательно

$$c \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dx} \left(k \frac{dv}{dx} \right).$$

Это уравненіе есть лишь переводъ на математическіе символы того, что сказано въ § 241.

250. Было бы совершенно несоотвѣтственно нашему плану вдаваться въ полное разсмотрѣніе различныхъ возможныхъ слѣдствій изъ уравненія Фурье. Мы ограничимся поэтому двумя частными вопросами, поставленными выше. И въ обоихъ случаяхъ мы примемъ проводимость и объемную теплоемкость постоянными въ предѣлахъ тѣхъ температуръ, которыя входятъ въ разсмотрѣніе.

251. Въ случаѣ неизмѣняющагося состоянія температуры мы имѣемъ

$$\frac{dv}{dt} = 0,$$

откуда

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dv}{dx} \right) = 0, \text{ т. е. } v = A + Bx$$

Здѣсь A есть температура поверхности, а B — повышение температуры на каждый футъ глубины. Это выраженіе прямо могло быть получено изъ сказаннаго въ § 239.

Итакъ, при неизмѣняющемся состояніи температуры вблизи земной поверхности, поддерживаемой внутреннею теплотою, температура равномерно возрастаетъ на каждый футъ глубины, если всѣ слои обладаютъ одною и тою же проводимостью.

Если проводящая способность различна въ разныхъ

слояхъ, то повышеніе температуры на футъ глубины въ каждомъ слоѣ во столько разъ больше, во сколько проводимость слоя меньше. Слѣдуетъ обратить особенное вниманіе на то, что такъ какъ мы имѣемъ дѣло съ неизмѣняющимся состояніемъ температуры, то теплоемкость не входитъ въ наше уравненіе.

Количество теплоты, которое проходитъ въ минуту чрезъ квадратный футъ какого-либо слоя, численно равняется произведенію изъ проводимости на повышеніе температуры, соответствующее футу глубины.

Много наблюденій, имѣющихъ отношеніе къ этому предмету, собрано было въ теченіе послѣднихъ лѣтъ комиссіею *Британской Ассоціаціи*. Результаты очень измѣняются въ разныхъ мѣстностяхъ, но въ среднемъ повышеніе температуры въ минахъ, артезіанскихъ колодцахъ и т. п. составляетъ около $0^{\circ},01$ C на футъ. Среднее значеніе k можно принять приблизительно въ 0,024, такъ что ежегодный притокъ теплоты изнутри на каждый квадратный футъ земной поверхности составляетъ среднимъ числомъ около 126 единицъ теплоты. Для тропическихъ или умѣренныхъ странъ это не имѣетъ никакого значенія; но близъ полюсовъ этотъ ежегодный притокъ теплоты составляетъ нѣчто въ числѣ причинъ, препятствующихъ образованію ледяной коры болѣе 400 или 500 футъ толщиною.

252. Частныя стаціонарно - періодическія рѣшенія уравненія, удовлетворяющія условіямъ на поверхности (такъ какъ уравненіе линейное, то одновременно возможно любое число такихъ рѣшеній), необходимо будутъ имѣть форму

$$v_0 e^{-px} \cos \left[\frac{2\pi}{T} t - px + E \right],$$

гдѣ T есть періодъ колебанія, а $2v_0$ —его амплитуда на поверхности. Подставляя это значеніе въ уравненіе § 249, мы находимъ условіе

$$kp^2 = \frac{\pi c}{T}$$

Здѣсь, конечно, мы предполагаемъ k и т. д. постоянными, т. е. независящими ни отъ температуры, ни отъ глубины. Вводить въ эти величины измѣненія съ температурою нѣтъ надобности, такъ какъ предѣлы колебаній температуры въ этихъ періодическихъ рѣшеніяхъ обыкновенно малы. И задача становится слишкомъ сложною для книги, какъ эта, если предположить, что проводимость и тепловая емкость слоевъ измѣняются съ глубиною.

253. Итакъ, если земная поверхность подвергается въ теченіе достаточно долгаго времени простому гармоническому измѣненію температуры, то и во всѣхъ слояхъ коры будутъ происходить простыя гармоническія измѣненія температуры того же самаго періода.

Но амплитуды колебаній температуры при послѣдовательномъ углубленіи на равныя величины убываютъ въ геометрической прогрессіи. Знаменатель отношенія для единицы глубины есть

$$e^{-p} \quad \text{или} \quad e^{-\sqrt{\frac{\pi c}{kT}}}$$

Такимъ образомъ, амплитуды колебаній уменьшаются съ глубиною тѣмъ медленнѣе, чѣмъ выше проводимость или чѣмъ продолжительнѣе періодъ, и тѣмъ быстрѣе, чѣмъ больше объемная теплоемкость коры. Или, выражаясь въ точной формѣ, глубина, на которой ам-

плитуда колебаній температуры достигаетъ опредѣленной доли той, какая существуетъ на поверхности, прямо пропорціональна квадратнымъ корнямъ изъ проводимости и длины періода и обратно пропорціональна квадратному корню изъ объемной теплоемкости. Напримѣръ, такъ какъ квадратный корень изъ 365 составляетъ около 19, годовое колебаніе температуры на поверхности будетъ замѣтно на глубинѣ въ 19 разъ большей, нежели суточное — предполагая, что амплитуда колебаній на поверхности одна и та же.

Затѣмъ время, въ теченіе котораго максимальная температура достигаетъ какой-либо глубины, стоитъ въ прямомъ арифметическомъ отношеніи къ глубинѣ.

Скорость, съ которою тепловая волна распространяется внутрь, есть

$$\frac{2\pi}{pT} = 2\sqrt{\frac{\pi k}{cT}}$$

Она, слѣдовательно, прямо пропорціональна корню квадратному изъ проводимости и обратно пропорціональна корню квадратному изъ длины періода и объемной теплоемкости. Можно составить себѣ примѣрное понятіе о томъ, что происходитъ въ этомъ случаѣ, вообразивъ морскія волны движущимися отъ мелкихъ мѣстъ къ глубокимъ, т. е. обратно тому, что мы обыкновенно видимъ, когда волны направляются на отлогій берегъ: тогда высота волнъ, по мѣрѣ ихъ движенія впередъ, постоянно уменьшалась бы вмѣсто того, чтобы возрастать.

254. Наблюденіи надъ температурою на разныхъ глубинахъ было дѣлаемо въ различныхъ мѣстностяхъ. Самый обширный рядъ наблюденій есть тотъ, который, будучи начатъ въ 1837 году Форбсомъ, продолжается и

до сихъ поръ (съ перерывомъ въ 1876—1879 годахъ, когда производилась новая установка инструментовъ, которые были разрушены сумашедшимъ). Эти наблюденія дѣлались въ почвѣ Единбургской обсерваторіи, гдѣ резервуары гигантскихъ термометровъ, которыхъ шкалы находились надъ почвою, были опущены на глубины 3, 6, 12, и 24 французскихъ футовъ въ порфирную горную породу Calton Hill'a. Обычныя измѣненія температуры были столь малы, что оказалось достаточнымъ отчитывать термометры разъ въ недѣлю.

На основаніи только что даннаго очерка теоретическихъ результатовъ мы должны ожидать, что показанія этихъ четырехъ термометровъ будутъ весьма различны по общему характеру: термометръ ближайшій къ поверхности будетъ значительно подверженъ вліянію колебаній малаго періода, не проникающихъ далеко внутрь; тогда какъ показанія 24-футоваго термометра будутъ зависѣть лишь отъ колебаній болѣе продолжительнаго періода. Это и оправдывается на дѣлѣ.

255. Фурье далъ намъ способъ разлагать всякое строго періодическое колебаніе, какъ бы оно сложно ни было, на его отдѣльные простые гармоническіе элементы. Помощью этого способа мы можемъ выдѣлить изъ записанныхъ показаній каждаго термометра ту часть, которая соотвѣтствуетъ годовому измѣненію температуры отъ зимы до зимы; и на эту часть, какъ далеко болѣе важную, мы и обратимъ наше вниманіе. Приводимъ приблизительныя среднія для 1837—42 годовъ.

Средняя температура составляетъ около $7^{\circ},5$ С для высшаго термометра и постоянно возрастаетъ до $8^{\circ},1$

для самаго глубокаго (§ 251). Предѣлы годовыхъ колебаній для разныхъ инструментовъ по порядку были

$$8^{\circ},2; \quad 5^{\circ},6; \quad 2^{\circ},7; \quad 0^{\circ},7 \text{ С.}$$

Эти числа не слѣдуютъ очень точно закону геометрической прогрессіи (§ 253), но изъ нихъ мы получаемъ, принявъ годъ за единицу времени, среднее значеніе

$$\sqrt{\frac{\pi c}{k}} = 0,115 \text{ на франц. футъ (приблиз.)}$$

Эпохи наибольшихъ температуръ по порядку были 19 августа, 8 сентября, 19 октября, 6 января.

Онѣ очень точно слѣдуютъ закону арифметической прогрессіи (§ 253) и даютъ для скорости распространенія тепловой волны

$$2\sqrt{\frac{\pi k}{c}} = 54,8 \text{ фр. фут. въ годъ.}$$

Перемножая почленно два послѣднія равенства, мы находимъ, какъ ихъ повѣрку,

$$2\pi = 6,302;$$

результатъ согласуется съ истиннымъ въ предѣлахъ $\frac{1}{3}$ процента, и это можетъ внушить намъ нѣкоторое довѣріе къ точности работы вообще.

Взявъ теперь отношеніе соответственныхъ членовъ обоихъ равенствъ, мы имѣемъ

$$\frac{k}{c} = \frac{27,4}{0,115} = 238 \text{ (приблиз.)}$$

Значеніе c для данной горной породы, непосредственно найденное Реньо, составляетъ около 0,528.

Отсюда при взятой нами системѣ единицъ мы имѣемъ

$$k = 125,6.$$

Для приведенія къ англійскому футу мы должны умножить это число на 1,136, квадратъ отношенія длины французскаго фута къ длинѣ англійскаго. Далѣе, чтобы привести проводимость къ минутѣ, вмѣсто года, и къ обычнымъ единицамъ теплоты (§ 56), мы дѣлимъ на число минутъ въ году и умножаемъ на вѣсъ кубическаго фута воды въ фунтахъ. Послѣ этого мы окончательно находимъ, что

Проводимость порфира Calton Hill'a = 0,017;

число это можетъ быть сравниваемо съ числами таблицы § 246. Форбсъ наблюдалъ точно такимъ же образомъ измѣненія подземной температуры въ двухъ другихъ станціяхъ близъ Эдинбурга, гдѣ матеріалы коры были очень различны. Вотъ приблизительные результаты:

Проводимость песчаннаго грунта (Experimental Garden) 0,011.

Проводимость песчаника (Craigleith Quarry) 0,043.

Среднее изъ трехъ приведенныхъ чиселъ (0,024) было употреблено нами въ § 251 для примѣрной оцѣнки количества теплоты, которое ежегодно притекаетъ къ земной поверхности изнутри. Эти результаты даютъ намъ возможность вычислить, конечно, самымъ грубымъ образомъ, что количество теплоты, теряемое въ настоящее время внутренностью земли ежегодно, могло бы повысить температуру всей массы земли приблизительно на одну десятимилліонную градуса стоградуснаго термометра.

256. Показанія такихъ глубоко зарываемыхъ въ землю термометровъ, будучи по возможности освобождены отъ вліянія болѣе обыкновенныхъ поверхностныхъ возмущеній температуры, весьма цѣнны для сужденія о періодическихъ измѣненіяхъ дѣятельности солнца. Очень замѣчательное и поучительное сличеніе ихъ съ соответственными наблюденіями надъ количествомъ солнечныхъ пятенъ, сдѣланное шотландскимъ королевскимъ астрономомъ (Scottish Astronomer Royal), можно найти въ *Edinburgh Observations*, vol. XIV, табл. 17.

257. Распространеніе теплоты путемъ проводимости есть по существу своему разсѣяніе энергіи; ибо, каковъ бы ни былъ на дѣлѣ механизмъ явленія (см. § 233) и какъ бы мало времени оно ни длилось, непременно происходитъ потеря въ полезности тепловой энергіи, такъ какъ, по крайней мѣрѣ, часть теплоты падаетъ при этомъ съ высшей температуры на низшую.

Мы бы далеко зашли за предѣлы сочиненія, подобнаго этому, еслибъ стали разсматривать вѣковое охлажденіе земли или вопросъ о продолжительности солнечной теплоты—предметы, разобранные въ недавнее время В. Томсономъ. Ихъ важность, особенно по отношенію къ вопросамъ геологическаго времени, настолько велика, что, надо надѣяться, пройдетъ немного лѣтъ, какъ будутъ придуманы и осуществлены экспериментальные методы, которые дадутъ намъ возможность сдѣлать въ самомъ дѣлѣ удовлетворительныя опредѣленія проводимости и объемной теплоемкости горныхъ породъ и лавъ въ широкихъ предѣлахъ температуры. Въ этой части нашего предмета опытъ въ особенности находится еще далеко позади теоріи и математическихъ методовъ.

258. Здѣсь слѣдуетъ, однако, сдѣлать одно важное

замѣчаніе. *Прерывность* температуры невозможна въ проводящемъ тѣлѣ, если въ немъ не происходитъ внезапнаго развитія теплоты. Поэтому, если, переходя съ помощью методовъ Фурье отъ настоящаго къ различнымъ необходимымъ предшествовавшимъ распредѣленіямъ температуры, мы находимъ, что въ нѣкоторую опредѣленную эпоху имѣла мѣсто такая прерывность, то мы *встрѣчаемся съ новою задачею*; мы вынуждены заключить, что это положеніе вещей не произошло только путемъ проводимости и что въ рассматриваемую эпоху долженъ былъ существовать нѣкоторый источникъ теплоты, не принятый въ расчетъ въ нашихъ уравненіяхъ. Но трудность подобныхъ вопросовъ выходить за тѣ предѣлы, которыми должно ограничиваться элементарное сочиненіе.

259. До сихъ поръ мы предполагали проводящія тѣла, съ которыми имѣли дѣло, изотропными (§ 100). Но требуются, конечно, особые опыты, чтобы рѣшить, являются ли тѣла, которыя очевидно неизотропны по своему молекулярному сложенію—какъ дерево, волокнистое или прокатное желѣзо, кристаллы (всѣхъ системъ, кромѣ правильной) и т. д. — также неизотропными въ отношеніи теплопроводимости. Этотъ вопросъ разрѣшенъ утвердительно, главнымъ образомъ тщательными изслѣдованіями Сенармона, который придумалъ слѣдующій чрезвычайно простой и изящный экспериментальный методъ.

Изъ изслѣдуемаго вещества вырѣзывается тонкая пластинка съ параллельными сторонами такъ, чтобы направленіе ея нормали составляло извѣстный уголъ съ главными осями кристалла. Пластинка съ поверхности покрывается тонкимъ слоемъ воска. Черезъ отверстіе,

сдѣланное въ пластинкѣ перпендикулярно къ ея сторонамъ, плотно пропускается толстая мѣдная или серебряная проволока; проволока нагревается до определенной температуры лампой (отъ тепловыхъ лучей которой пластинка защищена помощью экрана) или, лучше, пропускаемымъ по ней электрическимъ токомъ. Если пластинка состоитъ изъ стекла или другого изотропнаго матеріала, то воскъ плавится кружкомъ (вокругъ отверстия, какъ центра), который увеличивается все медленнѣе и медленнѣе, пока не достигнетъ определенного діаметра, зависящаго отъ проводимости, отъ объемной теплоемкости и отъ быстроты поверхностнаго охлаждения пластинки. Если же пластинка вырѣзана изъ вещества неизотропнаго, то граница расплавившагося воска обыкновенно образуетъ эллипсъ (котораго центръ также совпадаетъ съ отверстиемъ). Рис. 44 предста-

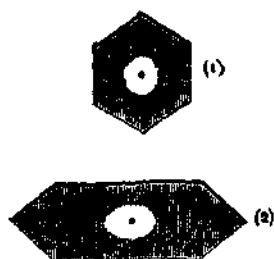


Рис. 44.

вляетъ въ грубыхъ чертахъ явленіе, когда взята пластинка кварца, вырѣзанная (1) перпендикулярно, (2) параллельно оси гексагональной призмы; по направленію этой оси проводимость наибольшая. Если вещество (какъ въ настоящемъ случаѣ) однородно, то объемная теплоемкость его одна и та же во всѣхъ точкахъ, и такимъ

образомъ изъ результатовъ опыта можно заключить о различныхъ проводимостяхъ по разнымъ направленіямъ. Измѣряя отношеніе осей эллипса и наблюдая ихъ направленія въ разрѣзахъ, сдѣланныхъ въ разныхъ ориентаціяхъ, мы можемъ приблизительно опредѣлить форму и положеніе того эллипсоида, на поверхности котораго въ массѣ вещества возбуждается данная температура, когда источникомъ теплоты служить одна только точка.

260. Математическая теорія этого опыта (замѣчательнымъ образомъ изложенная Стоксомъ въ *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, vol. VI) показываетъ, что проводимости параллельно осямъ эллипсоида (которые суть главные оси теплопроводимости) пропорциональны квадратамъ длины этихъ осей. Изъ теорій также слѣдуетъ, что вслѣдствіе поверхностной потери теплоты пластинкою измѣняются только размѣры, но не форма эллипса на пластинкѣ.

Если пластинка умѣренной толщины, то кривыя на обѣихъ ея сторонахъ обыкновенно имѣютъ скорѣе овоидальную, нежели эллиптическую форму, причемъ болѣе узкіе концы бывають обращены съ обѣихъ сторонъ въ противоположныя стороны. Это происходитъ отъ того, что проволока была пропущена перпендикулярно пластинкѣ. Если же отверстіе сдѣлано въ направленіи діаметра эллипсоида проводимости, сопряженнаго съ плоскими свѣченіями параллельными пластинкѣ, то кривыя на обѣихъ поверхностяхъ пластинки суть подобныя, равныя и подобнымъ образомъ расположенные эллипсы, чьихъ центры совпадаютъ съ концами отверстія.

261. Теплопроводимость жидкостей (за исключеніемъ ртути и другихъ расплавленныхъ металловъ) вообще

чрезвычайно мала. Известно, что можно вскипятить верхніе слои воды въ сосудѣ осторожнымъ впусканіемъ пара, въ то время, какъ температура воды на глубинѣ одного или двухъ дюймовъ не измѣняется замѣтнымъ образомъ. Выраженная въ употреблявшихся выше единицахъ проводимость воды, одного изъ лучшихъ проводниковъ между жидкостями, вѣроятно, менѣе 0,01.

Проводимость газовъ еще меньше и поэтому очень трудно опредѣляется. Но она можетъ быть *вычислена* на основаніи кинетической теоріи; мы поэтому въ настоящее время откладываемъ ея разсмотрѣніе.

262. *Содержаніе §§ 233—261.* Механизмъ распространенія теплоты проводимостью. Предварительныя объясненія. Великое твореніе Фурье. Опредѣленіе «теплопроводимости». Термометрическая проводимость. Паденіе (gradient) температуры. Основное допущеніе. Экспериментальный методъ Форбса. Результаты Форбса, Ангстрема и другихъ. Методъ Ангстрема. Вліяніе внутренней теплоты и періодическаго поверхностнаго нагреванія на температуру земной коры. Грунтовые термометры. Проводимость земной коры. Проводимость въ не-изотропныхъ тѣлахъ. Въ жидкостяхъ и газахъ.

ГЛАВА XV.

Переносъ теплоты (конвекція).

263. См. §§ 73, 74. Изъ сказаннаго выше ясно, что теперь будетъ полезно нѣсколько измѣнить порядокъ изложенія предмета и поставить переносъ теплоты, какъ болѣе тѣсно связанный съ только что разсмотрѣнными явленіями, прежде лучеспусканія, которое ведетъ къ нѣсколько иному роду понятій.

264. Переносъ теплоты—предметъ величайшей важности, но вмѣстѣ съ тѣмъ, за исключеніемъ его основъ, чрезвычайно трудный. Вслѣдствіе этого онъ находился и теперь находится — по крайней мѣрѣ въ отрасляхъ болѣе прикладнаго характера — главнымъ образомъ въ рукахъ чистыхъ эмпириковъ и слишкомъ мало въ рукахъ настоящихъ ученыхъ.

О важности предмета достаточно будетъ сказать, что онъ заключаетъ въ себѣ, прямо или косвенно, преобладающую часть метеорологіи, какъ и болѣе скромную область вентиляціи. Его трудность обусловливается главнымъ образомъ большою сложностью почти каждой его задачи, а не шаткостью основныхъ началъ, ибо они (по

крайней мѣрѣ въ главномъ) чрезвычайно просты. Прилагая ихъ, мы должны знать и принимать въ расчетъ все обстоятельства; потому что въ этой области, гораздо болѣе, чѣмъ почти въ каждой другой отрасли физики, причины, кажущіяся на первый взглядъ самыми ничтожными и неважными, часто совершенно измѣняютъ дѣйствительный характеръ результата.

265. Такъ какъ переносъ теплоты совершается только путемъ относительнаго движенія частей жидкости ¹⁾, то онъ собственно входитъ въ составъ гидрокинетики ²⁾ и, слѣдовательно, полное его разсмотрѣнiе основывается на началахъ, которыя мы сюда вводить не можемъ. Но такъ какъ всякое ускорительное движеніе жидкостей обусловлено разностью давленій, то мы должны разсмотрѣть, какъ такіа разности могутъ производиться теплою. Тѣло болѣе легкое, нежели равный ему объемъ воды, стремится подыматься въ этой жидкости, потому что избытокъ вертикальнаго давленія на нижнюю поверхность тѣла надъ давленіемъ на верхнюю больше вѣса всего тѣла. Точно такимъ же образомъ данное количество воздуха будетъ стремиться подыматься при повышеніи температуры и опускаться при пониженіи ея, ибо воздухъ въ свободной атмосферѣ съ измѣне-

¹⁾ Въ этой главѣ, рассматривающей теченія въ жидкостяхъ и газахъ одновременно, слово «жидкость» употребляется въ его болѣе широкомъ значеніи соответственно англійскому «fluid», т. е. относится какъ къ капельножидкимъ тѣламъ, такъ и къ газамъ. *Зам. р. перев.*

²⁾ «Кинетика», по современной англійской терминологіи, есть та часть динамики (см. выноску на стр. 12), которая изучаетъ законы движенія: динамика дѣлится на статику и кинетику. *Зам. р. перев.*

ніемъ температуры расширяется и сжимается на дѣлѣ такъ, какъ при *постоянномъ давленіи* (§ 127). Это хорошо видно на тѣхъ воздушныхъ шарахъ, которые поднимаются вслѣдствіе нагрѣванія и разрѣженія ихъ газообразнаго содержимаго пламенемъ, помѣщеннымъ снизу подъ отверстіемъ оболочки. Разрѣженный воздухъ, не заключенный въ оболочкѣ, подымается еще скорѣе, что прекрасно замѣтно, если осторожно пустить облако табачнаго дыма на пламя, горящее въ свободномъ воздухѣ. Въ этомъ случаѣ движеніе дыма въ точности указываетъ форму и быстроту произведеннаго воздушнаго тока. Мы имѣемъ здѣсь сильное теченіе вертикально вверхъ надъ пламенемъ и (приблизительно горизонтальный) притокъ холоднаго воздуха къ пламени со всѣхъ сторонъ.

266. Дѣйствіе значительно усиливается, если ввести пламя въ нижній конецъ стеклянной или металлической трубки, которая держится вертикально. Этотъ простой опытъ составляетъ основаніе всей системы вентиляціи посредствомъ колодцевъ или каминовъ, въ нижней части которыхъ разводится огонь. Какъ уже упомянуто выше, вычисленіе дѣйствія даже въ этомъ простомъ случаѣ, если не считать перваго грубаго приближенія, есть чрезвычайно трудная задача; такъ какъ она не поддавалась до сихъ поръ точному разбору, то ее разрѣшили приблизительно при помощи гипотезъ, на которыя навелъ опытъ.

Въ хорошую лѣтнюю погоду мы имѣемъ у морского берега въ большихъ размѣрахъ постоянные примѣры того же явленія; оно происходитъ вслѣдствіе большихъ измѣненій температуры берега, между тѣмъ какъ тем-

пература моря остается приблизительно постоянною въ теченіе цѣлыхъ сутокъ.

Когда почва нагревается прямыми лучами солнца, она нагреваетъ лежащій надъ нею воздухъ, который подымается вверхъ, замѣщаясь горизонтальнымъ притокомъ холоднаго воздуха. Такимъ образомъ происходитъ морской бризъ (*Sea-breeze*). Когда же ко времени солнечнаго заката или послѣ него берегъ охлаждается вслѣдствіе не уравновѣшиваемаго излученія въ пространство, воздухъ надъ почвою дѣлается холоднѣе морского; тогда послѣдній въ свою очередь подымается, а береговой воздухъ, притекая, замѣщаетъ его мѣсто: мы имѣемъ береговой бризъ (*Land-breeze*).

267. То же самое хорошо видно въ водѣ, когда она нагревается въ колбѣ снизу небольшимъ пламенемъ. Прибавивъ къ водѣ немного отрубей, мы прямо можемъ наблюдать происходящія при этомъ токи. Вдоль оси колбы постоянно подымается столбъ нагрѣтой воды, которая замѣщается болѣе холодною водою, текущей внизъ, вблизи стѣнокъ. Такъ можно поддерживать непрерывный круговоротъ жидкости, если постоянно охлаждать стѣнки колбы.

Обратное явленіе легко наблюдать, если, удерживая стѣнки и дно колбы при умѣренной температурѣ, пустить на поверхность воды нѣсколько кусочковъ льду. Но если стѣнки не удерживаются теплыми и если продолжаютъ прибавлять ледъ, процессъ прекращается (какъ въ § 21). Какъ только вода охладится до 4°. Когда это состояніе достигнуто, приложеніе гидростатическаго давленія возобновляетъ круговоротъ, потому что тѣмъ самымъ понижается точка наибольшей плотности воды (§ 121). Продолжая давленіе до тѣхъ поръ, пока не

расплавится весь ледъ, мы достигнемъ нѣкотораго распредѣленія температуры, при которомъ теченій не будетъ. Но они начинаются снова, если давленіе будетъ устранено. Однако, потребное для этихъ пѣлей давленіе измѣряется тоннами на квадратный дюймъ.

Для полнаго разбора предмета нужны дальнѣйшія опытные данныя; но уже изъ сказаннаго видно, что онъ представляетъ своеобразный интересъ, въ особенности по отношенію къ теченіямъ въ глубокихъ прѣсноводныхъ озерахъ въ то время года, когда температура на какой либо глубинѣ колеблется около точки наибольшей плотности, соответствующей данной глубинѣ. Этихъ затрудненій не встрѣчается въ случаѣ морской воды, ибо даже подъ атмосфернымъ давленіемъ она замерзаетъ прежде, чѣмъ температура ея понизится до нѣрвной точки ея наибольшей плотности.

268. Въ книгѣ, какъ эта, мы не можемъ входить въ разсмотрѣніе общихъ вопросовъ атмосферныхъ или океаническихъ теченій, хотя эти вопросы и относятся собственно къ нашему предмету. Общ. задачи были бы громадны, даже если бы не было материковъ и твердая земля была совершенно шарообразна. Ибо, не говоря уже о вращеніи земли, вліяніе котораго значительно (укажемъ напр. на происхожденіе пассатовъ и на противоположное *направленіе* вращенія циклоновъ къ сѣверному и южному полушаріяхъ), намъ приходится разсмотрѣть не только измѣненіе въ количествѣ и направленіи солнечныхъ лучей и его послѣдствія въ моряхъ и атмосферѣ, но и то, какимъ образомъ большія пространства по временамъ лишаются лучей вслѣдствіе образованія облаковъ. Уже этотъ одинъ элементъ является для нашего незнанія чѣмъ то «причудливымъ», т. е. по-

видимому не подлежащимъ никакому закону—хотя онъ, конечно (§ 9), какъ всякое физическое явленіе, есть нѣчто совершенно опредѣленное для того, кто знаетъ всѣ условія и могъ бы сполна вывести ихъ слѣдствія. Однако пробы показали, что какъ въ этомъ, такъ и во многихъ другихъ повидимому безнадежныхъ случаяхъ, можно получить приблизительные результаты, пользуясь *средними числами*, выведенными изъ длиннаго ряда наблюденій. За такими результатами должно обращаться къ *бнигамъ*, которыя посвящены этимъ специальнымъ задачамъ.

269. Какъ другой примѣръ «причудливости» подобныхъ явленій, представимъ себѣ въ сосудѣ два слоя не смѣшивающихся другъ съ другомъ жидкостей различной плотности. До тѣхъ поръ, пока болѣе плотная жидкость находится снизу, равновѣсіе устойчиво, и всякое умѣренное возмущеніе (произведенное напр. искусственнымъ подъемомъ части нижней жидкости въ верхнюю или вдавливаніемъ части верхней въ нижнюю) тотчасъ же выравнивается, причемъ приложенная энергія разсѣвается на пограничной поверхности въ формѣ волнъ, распространяющихся во всѣ стороны отъ центра возмущенія.

Когда же болѣе плотная жидкость находится сверху, равновѣсіе по существу своему неустойчиво, такъ что подобное расположеніе, конечно, не можетъ быть въ точности осуществлено на дѣлѣ. Но всякій разъ, какъ такое расположеніе приблизительно достигается, верхняя жидкость прорывается внизъ не по всей разграничивающей поверхности одновременно, но въ одномъ или нѣсколькихъ мѣстахъ, которыя совершенно опредѣлены, хотя мы и не имѣемъ данныхъ, чтобы ихъ указать впередъ.

Въ нѣкоторыхъ изъ этихъ мѣстъ столбы болѣе плот-

ной жидкости направляются внизъ, въ другихъ—столбы болѣе легкой поднимаются вверхъ. Существуетъ, безъ сомнѣнія, важное различіе между этимъ случаемъ и тѣмъ, когда мы имѣемъ два слоя одной и той же жидкости при различныхъ температурахъ; ибо въ послѣднемъ случаѣ проводимость (какъ бы мала она ни была) очень скоро уничтожаетъ неоднородность на пограничной поверхности, тогда какъ въ первомъ обыкновенно дѣйствуетъ капиллярное поверхностное натяженіе въ раздѣляющемъ слое. Но результаты, по скольку они касаются природы самаго движенія, очень сходны въ обоихъ случаяхъ.

270. Такимъ образомъ, вертикальные токи въ опредѣленномъ мѣстѣ могутъ быть произведены и нагрѣваніемъ соответственныхъ нижнихъ частей жидкой массы, и охлажденіемъ верхнихъ. Охлажденіе нижнихъ частей или нагрѣваніе верхнихъ имѣетъ вообще далеко меньшее значеніе. Поэтому главные фазы *океаническихъ теченій* (по скольку онѣ не зависятъ отъ вѣтровъ, т. е. отъ *атмосферныхъ теченій*) гораздо болѣе обуславливаются полярнымъ холодомъ, нежели тропическимъ тепломъ. Напротивъ, атмосферныя теченія гораздо болѣе зависятъ отъ тропическаго тепла, чѣмъ отъ полярнаго холода. Ибо большія температурныя измѣненія происходятъ главнымъ образомъ на верхней поверхности океана и на нижней границѣ атмосферы. Поэтому, если нѣтъ важныхъ нарушающихъ причинъ, мы должны ожидать (въ общемъ), что нижніе слои воды, какъ и нижніе слои воздуха, будутъ съ обѣихъ сторонъ направляться къ экватору, а верхніе токи воды и воздуха—къ полюсамъ.

Подобнымъ же образомъ, если въ какой-либо мѣстности сѣверной умѣренной полосы простирается большая

нагрѣтая поверхность, то отъ нея подымается столбъ теплаго воздуха, а со всѣхъ сторонъ притекаетъ болѣе холодный. Но такъ какъ вслѣдствіе вращенія земли воздухъ, притекающій съ юга, имѣетъ болѣшую, а притекающій съ сѣвера меньшую скорость къ востоку, нежели центральная часть, то въ результатѣ теченіе будетъ спиральнымъ и въ общемъ образуетъ вихрь (циклонъ), вращающійся въ томъ направленіи, въ какомъ земля обращается вокругъ сѣвернаго полюса. Холодное воздушное теченіе сверху внизъ также образуетъ вихрь, но вращеніе его направлено въ противоположную сторону (антициклонъ); и такъ какъ этотъ вихрь спускается сверху, то онъ обыкновенно представляетъ явленіе менѣе разрушительное. Въ южномъ полушаріи оба эти вращенія получаютъ обратныя направленія. Должно однако замѣтить, что сказанные результаты произойдутъ необходимымъ образомъ только въ томъ случаѣ, когда возмущеніе обнимаетъ широкое пространство. Меньшіе вихри, отъ смерчей и пыльных вихрей до нѣкоторыхъ видовъ мѣстныхъ грозовыхъ бурь, представляютъ явленія, въ которыхъ вращеніе вообще обусловливается внутреннимъ треніемъ жидкостей; не касаясь ихъ здѣсь, мы только упомянемъ, что *направленіе* вращенія зависитъ въ такихъ случаяхъ отъ чисто мѣстныхъ условій.

271. До сихъ поръ мы не принимали во вниманіе водяныхъ паровъ, хотя атмосферный воздухъ обыкновенно содержитъ ихъ въ значительномъ количествѣ. Водяной паръ является главнымъ дѣятелемъ во многихъ важнѣйшихъ метеорологическихъ явленіяхъ; но мы должны ограничиться только тѣми, въ которыхъ дѣйствіе пара связано съ тепловыми явленіями.

Каждый знаетъ по опыту, какой тонкій слой обла-

ковъ или тумана достаточенъ для того, чтобы задержать большую часть солнечнаго тепла. Это можетъ происходить лишь путемъ поглощенія тепловыхъ лучей этимъ слоемъ (за исключеніемъ лучей, отражаемыхъ или разсѣваемыхъ имъ), такъ что косвенно нагревается и самый воздухъ. Облако дѣлается такимъ образомъ, вмѣсто земной поверхности, тою посредствующею средою, которая сообщаетъ воздуху солнечныя лучи.

Но вещество воды дѣйствуетъ энергично еще совершенно инымъ путемъ. Мы видѣли, какъ велика скрытая теплота водяного пара; мы знаемъ также, что выпаденіе одного дюйма дождя въ часъ не представляетъ чего-либо необыкновеннаго: при этомъ большая часть воды, по крайней мѣрѣ, берется изъ первой мили атмосферы. Высота «однородной атмосферы»¹⁾ составляетъ около 5 миль, а водяной барометръ стоитъ на 34 футахъ высоты. Поэтому масса воздуха въ нижнемъ слое, высотой въ одну милю и въ одинъ квадратный футъ поперечнаго сѣченія, значительно меньше массы 7 кубич. футовъ воды, а именно вѣситъ только около 360 фунтовъ. Удельная теплота воздуха (§ 187) составляетъ около 0,25, такъ что теплоемкость воздушнаго столба около 90. Одинъ дюймъ выпавшей воды соответствуетъ приблизительно 5 фунтамъ воды на квадратный футъ, и это количество воды, сгущаясь изъ парообразнаго состоянія, выдѣляетъ около 3000 единицъ теплоты. Слѣдовательно, если бы весь паръ сгустился сразу, то температура нижняго воздуха повысилась бы приблизительно

¹⁾ Т. е. высота атмосферы, которая, имѣя равномерную плотность, производила бы то же давление, какъ дѣйствительная атмосфера. *Зам. р. переа.*

на 33° С! Результатъ является еще болѣе поразительнымъ, если мы выразимъ его въ работѣ. Онъ отвѣчаетъ слишкомъ четыремъ милліонамъ футофунтовъ, или работѣ одной лошади въ теченіе двухъ часовъ! На кубическую милю нижняго воздуха это составило бы работу милліона лошадей въ теченіе пятидесяти часовъ. [Если все это число лошадей поставить на протяженіи квадратной мили, то онѣ только что помѣстились бы — на долю каждой пришлось бы по три квадратныхъ ярда]. Мы взяли, конечно, крайній случай, но онъ показываетъ, что одною только скрытою теплотою паровъ въ воздухѣ не трудно объяснить энергію, проявляющуюся въ самыхъ страшныхъ ураганахъ. И эта энергія, конечно, берется главнымъ образомъ въ лучистой формѣ отъ солнца. Это прямо приводитъ насъ къ предмету слѣдующей главы.

272. Мы не можемъ разбирать здѣсь, какимъ образомъ теплый и влажный воздухъ охлаждается, расширяясь при поднятій, какъ онъ снова частью нагрѣвается вслѣдствіе осажденія воды, и такъ далѣе. Условія конвекціоннаго *равновѣсія* влажнаго воздуха представляютъ тоже не простую задачу*), хотя и почти несравнимо болѣе легкую, чѣмъ условія его движенія. — Затѣмъ мы можемъ лишь указать на чрезвычайно сильныя теченія въ солнечной атмосферѣ, гдѣ посредствомъ вполне надежныхъ методовъ открыты скорости въ сто и болѣе миль въ секунду.

273. Прекрасное приложеніе началъ, изложенныхъ въ этой главѣ, было сдѣлано Джоулемъ для опредѣленія

*) См. краткій разборъ ея, сдѣланный В. Томсономъ (*Manchester Memoirs*, 1862).

точки наибольшей плотности воды и для измѣренія теплого излученія луны. Нѣтъ надобности описывать подробностей его аппарата; въ главныхъ же чертахъ онъ состоялъ изъ замкнутого кругового пути, расположеннаго въ вертикальной плоскости и содержащаго жидкость. Въ жидкости возникаетъ теченіе всякій разъ, какъ только вслѣдствіе разницы въ температурахъ или по другимъ причинамъ плотность жидкости въ обѣихъ вертикальныхъ частяхъ пути сдѣлается неодинаковою.

274. *Содержаніе §§ 263—273.* Механизмъ переноса теплоты. Основаніе вентиляціи. Береговой и морской бризы. Причины атмосферныхъ и океаническихъ теченій. Циклоны и антициклоны. Смерчи и пыльные вихри. Дѣйствія водяныхъ паровъ. Теченія въ солнечной атмосферѣ. Конвекціонный аппаратъ Джоуля.

ГЛАВА XVI.

Излученіе.

275. См. §§ 40, 73, 74. Выраженіе «лучистая» теплота—хотя и нельзя надѣяться, чтобы мы отъ него избавились—можетъ быть оправдано еще менѣе, чѣмъ выраженія «удѣльная» или «скрытая» теплота, которыхъ право на существованіе мы уже разсмотрѣли (§§ 147, 179). Явленія лучеиспусканія, какъ и звука, относятся всѣ къ одному классу или семейству, и такъ-называемая лучистая теплота просто есть *светъ*.

Слѣдующее мѣсто представляетъ вопросъ 18 изъ третьей книги Ньютоновой *Оптики*:

«Если въ два большіе цилиндрическіе стеклянные сосуда, опрокинувъ ихъ, подвѣсить по маленькому термометру такъ, чтобы они не касались сосудовъ, выкачать воздухъ изъ одного сосуда и перенести сосуды, приготовленные такимъ образомъ, изъ холоднаго мѣста въ теплое, то термометръ въ *пустотѣ* нагрѣвается настолько же и почти такъ же скоро, какъ термометръ, не находящійся въ *пустотѣ*; и если сосуды перенести обратно въ холодное мѣсто, то термометръ въ *пустотѣ* охлажда-

дается почти такъ же скоро, какъ другой термометръ. Не передается ли тепло нагрѣтой комнаты чрезъ *пустоту* посредствомъ колебаній среды гораздо болѣе тонкой, нежели воздухъ, среды, которая остается въ *пустотѣ* послѣ извлеченія воздуха? И не есть ли это та самая среда, посредствомъ которой свѣтъ преломляется и отражается, колебаніями которой свѣтъ сообщаетъ тѣламъ теплоту и приводится къ приступамъ легкаго отраженія и легкаго прохожденія? И не содѣйствуютъ ли колебанія этой среды въ нагрѣтыхъ тѣлахъ напряженности и продолжительности ихъ теплоты? И не сообщаютъ ли нагрѣтыя тѣла свою теплоту прикасающимся къ нимъ холоднымъ посредствомъ колебаній этой среды, которыя распространяются изъ нихъ въ холодныя тѣла? И эта среда, не гораздо ли она рѣже и тоньше воздуха и не гораздо ли она эластичнѣе и дѣятельнѣе? И не проникаетъ ли она легко чрезъ всѣ тѣла? И не распространена ли она (вслѣдствіе своей упругой силы) по всему небесному пространству?»

276. Мы знаемъ изъ опыта, что есть звуки, которые, дѣйствуя болѣзненно на нѣкоторыхъ, совершенно не слышатся другими людьми, хотя послѣдніе обладаютъ вообще вполне хорошимъ слухомъ и находятся въ одинаково благопріятномъ положеніи относительно источника звука. Причину этого легко найти. Такіе звуки всегда бываютъ или очень низкими, или очень высокими. Другими словами, для каждого человѣческаго уха существуютъ извѣстные *предѣлы* ряда слышимыхъ звуковъ. Для большей части лицъ эти предѣлы ограничиваются приблизительно одиннадцатью октавами, и средняя нота соотвѣтствуетъ 1500 колебаніямъ въ секунду. Отсюда, полагаясь только на наше ухо, мы могли бы

предположить, что періодическія сгущенія и разрѣженія воздуха необходимо должны быть ограничены этими предѣлами, предположеніе, которое совершенно не согласуется съ извѣстными динамическими свойствами воздуха. Но здѣсь мы имѣемъ ту выгоду, что знаемъ (по крайней мѣрѣ, съ большою степенью точности) природу объективнаго явленія, и такимъ образомъ подготовлены къ пониманію, что границы слышимыхъ нами звуковъ могутъ въ значительной мѣрѣ зависѣть отъ механизма слухового органа. Въ этомъ смыслѣ границы слышимыхъ звуковъ могутъ считаться чисто субъективными, и мы легко можемъ представить себѣ, что нѣкоторыя животныя большихъ размѣровъ, чѣмъ человекъ, вслѣдствіе болѣе грубаго устройства слухового органа, слышатъ сплошные звуки тамъ, гдѣ воздухъ дѣлаетъ два или три колебанія въ секунду. Съ другой стороны, мы можемъ представить себѣ насѣкомыхъ, для которыхъ всѣ слышимые звуки лежатъ въ предѣлахъ звуковъ настолько высокыхъ, что они не дѣйствуютъ ни на какое человѣческое ухо. Въ томъ же самомъ убѣждаетъ насъ дальше слѣдующее общезвѣстное явленіе. Если по большому колокоду или камертону крѣпко ударить твердымъ тѣломъ, напр. молоткомъ, то произведенный звукъ сперва чрезвычайно рѣзокъ и немзыкаленъ; но, ослабѣвая постепенно, онъ становится чистымъ звукомъ, свойственнымъ инструменту. Металлическій звукъ, который слышится въ началѣ, состоитъ изъ большого числа тоновъ, не имѣющихъ необходимаго музыкальнаго отношенія другъ къ другу. Но эти тона исчезаютъ тѣмъ быстрѣе, чѣмъ они выше, такъ что спустя короткое время слышится только низкій основной тонъ.

Но мы можемъ идти еще дальше. Очень низкія ноты,

какъ тѣ, которыя издаются самыми длинными органическими трубами, мы *чувствуемъ* почти столько же, сколько слышимъ; и то-же самое замѣчается, когда мы находимся въ помѣщеніи, въ которомъ работаетъ много машинъ, какъ напр. на фабрикахъ, гдѣ нашъ мозгъ подвергается особенному подавляющему и даже болѣзненному дѣйствію, хотя мы едва ли можемъ назвать испытываемое нами ощущеніе «звукомъ». Въ этомъ ощущеніи, въ самомъ дѣлѣ, почти нѣтъ того, что мы обыкновенно называемъ звукомъ, и мы иногда сознаемъ, что оно было, только по тому чрезвычайно пріятному чувству облегченія, которое испытывается нами въ моментъ его прекращенія.

277. Аналогія тотчасъ ведетъ насъ къ вопросу: нѣтъ ли чего-нибудь подобнаго и въ нашемъ субъективномъ воспріятіи свѣта? И самыя простыя наблюденія дѣлають такую мысль по меньшей мѣрѣ весьма вѣроятною.

Существованіе на всѣхъ цивилизованныхъ языкахъ выраженій въ родѣ такихъ, какъ красное каленіе, бѣлое каленіе и т. п., есть одинъ изъ самыхъ рѣшительныхъ доводовъ. Эти выраженія показываютъ, что люди давно привыкли, основываясь на результатахъ опыта, соединять въ понятіи тепло со свѣтомъ. Если мы присоединимъ сюда тотъ основной фактъ наблюденія, что теплота всегда переходитъ съ болѣе теплаго тѣла на болѣе холодное, то мы должны будемъ разсматривать испусканіе свѣта нагрѣтымъ тѣломъ, по крайней мѣрѣ, какъ часть этого процесса. Когда тѣло мало-по-малу нагрѣвается въ темнотѣ, напр. толстая желѣзная проволока посредствомъ сильнаго электрическаго тока, то оно сперва дѣлается видимымъ только вслѣдствіе испусканія слабыхъ лучей большой длины волны, или малой прело-

мляемости; по мѣрѣ того, какъ тѣло становится горячѣе, оно испускаетъ большее количество этихъ низшихъ лучей, но къ нимъ присоединяется другіе бѣльшей преломляемости. Процессъ продолжается, если токъ достаточно силенъ, до тѣхъ поръ, пока проволока не раскалится до-бѣла, т. е. не будетъ издавать всѣ роды лучей видимаго свѣта приблизительно въ томъ отношеніи, въ какомъ они достигаютъ до насъ отъ солнца. Если теперь прервать токъ, то проволока представитъ тотъ же непрерывный рядъ явленій въ обратномъ порядкѣ. Но даже когда она перестанетъ быть видимою, мы *чувствуемъ* (держа руку *подъ* проволокой, дабы избѣжать вліянія теплыхъ воздушныхъ теченій), что она еще испускаетъ, постепенно все слабѣе и слабѣе, нѣчто производящее онущеніе тепла. Подумавъ объ аналогіи со звукомъ и о томъ, что высокіе звуки, какъ и бѣлье преломляемые лучи соотвѣтствуютъ бѣлье короткимъ періодамъ, или короткимъ волнамъ, мы придемъ къ заключенію, что все лучеиспусканіе есть одно непрерывное явленіе, которое только въ извѣстныхъ предѣлахъ дѣйствуетъ на глазъ, между тѣмъ какъ ниже этихъ предѣловъ оно можетъ быть обнаружено непосредственно лишь гораздо бѣлье грубымъ чувствомъ осязанія.

278. Это однако только предположеніе, хотя и сдѣланное на очень прочныхъ основаніяхъ. Чтобы перейти къ достовѣрности, мы должны изслѣдовать свойства невидимыхъ лучей и сравнить ихъ въ условіяхъ, по возможности разнообразныхъ, со свойствами видимыхъ лучей. Благодаря термоэлектрическому столбику и гальванометру (§§ 50, 62), мы можемъ нынѣ изслѣдовать темные лучи съ такою точностію, которая хотя во многихъ отношеніяхъ далеко меньше обыкновенно дости-

жимой въ оптическихъ процессахъ, однако, достаточно для нашей цѣли.

[Здѣсь предполагаются уже извѣстными нѣкоторые основные факты изъ оптики. Мы не можемъ уклоняться ради приведенія сущности доказательствъ ихъ истинны].

279. Въ свободномъ пространствѣ или въ воздухѣ равномерной плотности свѣтъ движется по прямымъ линіямъ. То же относится до лучистой теплоты, исходить ли она отъ солнца, или отъ земного источника. Непрозрачное препятствіе, задерживающее свѣтъ, задерживаетъ и теплоту, каковъ бы яи былъ источникъ.

Лучистая теплота распространяется со скоростью фактически равною скорости свѣта. Послѣ полного солнечнаго затмѣнія тепловые лучи (насколько точно это можетъ быть доказано) появляются одновременно со свѣтомъ. Они, слѣдовательно, распространяются со скоростью около 186000 миль въ секунду. Эта большая скорость, общая лучамъ теплоты и свѣта, уже служить почти достаточнымъ доказательствомъ тождества въ самомъ механизмѣ распространенія.

Зажигательныя зеркала и зажигательныя стекла показываютъ, что законы отраженія и преломленія одинаковы для свѣта и для темныхъ лучей. Ибо тепловые лучи собираются въ томъ же самомъ мѣстѣ, какъ лучи свѣта. Это однако совершенно точно въ случаѣ зеркала, но не линзы. Чтобы получить самое сильное дѣйствіе съ зажигательнымъ стекломъ, мы должны помѣстить его немного дальше отъ экрана, чѣмъ если бы хотѣли получить самое чистое изображеніе солнца. Но названное обстоятельство даетъ намъ еще болѣе сильный доводъ въ пользу нашего предположенія, такъ какъ фокусное разстояніе для красныхъ лучей больше, чѣмъ для синихъ (если только

линза не ахроматизирована для этихъ двухъ группъ лучей), и мы можемъ ожидать, что фокусное разстояніе для лучей, стоящихъ ниже, будетъ еще больше.

Опыты съ зажигательнымъ стекломъ, конечно, весьма грубы; но лордъ Россъ и другіе нашли, что когда хотятъ сосредоточить темные лучи звѣзды на маленькомъ термоэлектрическомъ столбикѣ посредствомъ зеркала или объективного стекла самого большого телескопа, то достаточно только, чтобы на столбикъ было наведено свѣтовое изображеніе.

280. Напряженность свѣта, распространяющагося отъ свѣтоваго источника малыхъ размѣровъ чрезъ прозрачную средину, обратно пропорціональна квадрату разстоянія отъ источника. Термоэлектрическій столбикъ показываетъ намъ, что то же самое вѣрно и по отношенію къ лучистой теплотѣ. Но это, впрочемъ, не дополняетъ нашей аналогіи, ибо то же самое относится до всякой формы энергіи, распространяющейся *прямолинейно* по всѣмъ направленіямъ отъ источника малыхъ размѣровъ, конечно, въ предположеніи, что на пути ничего не поглощается.

Свѣтящая поверхность является одинаково свѣтлою, каково ни было ея разстояніе отъ глаза (предполагая, что свѣтъ не поглощается промежуточною срединою). Подобнымъ же образомъ, если мы направимъ собирательный конусъ термоэлектрическаго столбика на равномерно нагрѣтую поверхность (рис. 45), то отклоненіе гальванометра будетъ одинаково при всѣхъ разстояніяхъ столбика отъ поверхности—по крайней мѣрѣ до тѣхъ поръ, пока поверхность будетъ заполнять собою весь уголъ разтворенія конуса. Это опять есть лишь слѣдствіе прямолинейнаго распространенія безъ поглощенія на пути.

Равноmäßigно свѣтящаяся поверхность представляется одинаково свѣтлой во всѣхъ мѣстахъ, какъ бы она ни была наклонена въ различныхъ точкахъ къ лучу зрѣнія. Подобнымъ образомъ, если большая нагрѣтая поверхность равноmäßigнаго строенія испускаетъ лучи на столбикъ чрезъ отверстіе, то количество получаемой теплоты не измѣняется при измѣненіи наклона поверхности, пока она (если смотрѣть на нее отъ столбика)

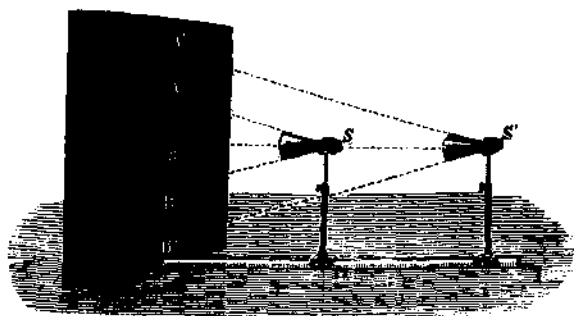


Рис. 45.

представляется заполняющею все отверстіе. Отсюда слѣдуетъ, что напряженность лучей, свѣтлыхъ или темныхъ, испускаемыхъ нагрѣтою поверхностью въ какомъ-либо направленіи, пропорціональна косинусу угла, который составляется этимъ направленіемъ съ перпендикуляромъ къ поверхности. [Мы увидимъ, что это есть необходимое слѣдствіе основнаго стремленія теплоты къ равноmäßigности въ температурѣ].

281. Тѣла чрезвычайно отличаются другъ отъ друга по количеству поглощаемаго ими свѣта. То же относится до лучистой теплоты. Но какъ есть тѣла весьма прозрачныя для синихъ лучей и почти непрозрачныя для

красныхъ или наоборотъ, такъ точно мы имѣемъ тѣла весьма прозрачныя для свѣта и почти непрозрачныя для темныхъ лучей и наоборотъ.

Подпирванная пластинка изъ каменной соли, если она суха, почти одинаково прозрачна для темныхъ лучей и для свѣта. Если сильно закоптить ее, то она становится фактически непрозрачною для свѣта, хотя и продолжаетъ пропускать значительную часть темныхъ лучей. Крѣпкій водный растворъ квасцовъ почти совершенно прозраченъ для свѣта и почти непрозраченъ для темныхъ лучей. То же относится до толстой стеклянной пластинки, въ чемъ мы ежедневно убѣждаемся, употребляя стеклянный экранъ, который позволяетъ намъ любоваться огнемъ камина и въ то же время защищаетъ насъ отъ непріятнаго жара.

282. Но съ этимъ связана еще дальнѣйшая аналогія.

Свѣтъ, прошедшій чрезъ пластинку изъ окрашеннаго стекла и тѣмъ ослабленный, гораздо менѣе ослабляется при проходѣ чрезъ вторую пластинку изъ того же самаго стекла, еще менѣе чрезъ третью и т. д.

Точно также, если, взявъ достаточно сильный излучающій источникъ, мы заставимъ пройти значительное количество темныхъ лучей чрезъ пластинку изъ обыкновеннаго зеркальнаго стекла, то «просвѣянные» такимъ образомъ лучи становятся способными проходить въ большемъ процентномъ количествѣ чрезъ вторую пластинку и т. д.

283. Всѣ описанные выше явленія (§§ 279—282) могутъ быть нынѣ безъ малѣйшихъ затрудненій воспроизведены при помощи термоэлектрическаго столбика и гальванометра. Незачѣмъ описывать необходимыхъ при-

способлений: они понятны сами собою. Вся эта часть нашего предмета прекрасно разработана Меллони, который расширил въ различныхъ направленіяхъ цѣнный трудъ Лесли. Расположеніе аппарата Меллони представлено на прилагаемомъ рисункѣ (46). Онъ не требуетъ поясненій.

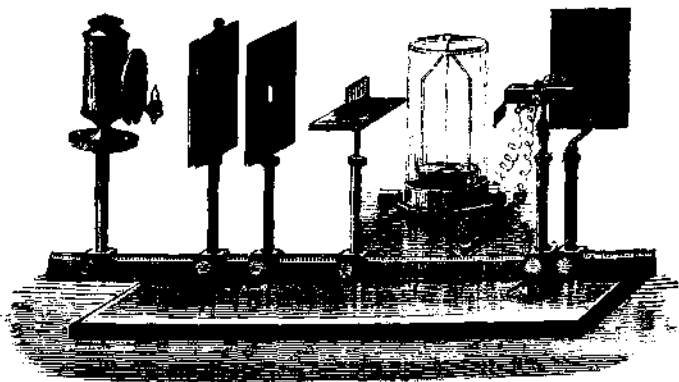


Рис. 46.

284. Мы могли бы привести еще много такихъ мѣнѣ совершенныхъ аналогій, но и приведенныхъ выше будетъ достаточно. Переходимъ теперь къ другимъ явленіямъ, которыя фактически убѣждаютъ насъ въ тождественности механизма всѣхъ родовъ излученія. Это именно явленія, послужившія для установки *волнообразной теоріи свѣта*. Когда оказывается, что они имѣютъ мѣсто и для тепловыхъ лучей, то нельзя долѣ сомнѣваться въ тождествѣ свѣта и лучистой теплоты. Этою частью нашего предмета мы опять обязаны Меллони и въ отдѣльности Форбсу. Любопытно отмѣтить, что первоначальныя соображенія Мора, 1837, относительно

истинной природы теплоты были главнымъ образомъ основаны на этихъ открытіяхъ. Мы ограничимся весьма краткимъ изложеніемъ, потому что опыты гораздо убѣдительнѣе, когда ихъ результаты непосредственно представляются глазу при помощи свѣтлыхъ лучей, чѣмъ когда ихъ приходится, такъ сказать, выщупывать въ темнотѣ посредствомъ термоэлектрическаго столбика.

285. Каждый знаетъ, что установкѣ волнообразной теоріи свѣта чрезвычайно способствовалъ Юнгъ, главнымъ образомъ своимъ началомъ *интерференціи* и его слѣдствіями. Точныя измѣренія явленій интерференціи дали средство опредѣлить *длину волны*, соответствующую каждому особому лучу; и весьма простое приспособленіе дало возможность доказать, что свѣтъ движется быстрѣе въ воздухѣ, нежели въ стеклѣ или водѣ, и слѣдовательно долженъ обусловливаться передачею энергій, а не передачею матеріальныхъ частичекъ. Все это однако не давало указанія на *природу* волнообразнаго движенія. Все это доказывало только, что вдоль пути луча существуетъ нѣкотораго рода перемѣщеніе, которое *въ точности* и періодически становится обратнымъ чрезъ каждыя полволны. Оно могло состоять или только въ скупеніи и разрѣженіи, какъ при звуковой волнѣ; или быть только поперечнымъ, какъ въ случаѣ колебаній фортепьянной струны; или частью продольнымъ, частью поперечнымъ, какъ въ волнахъ на водяной поверхности.

Но явленія *поляризаціи* тотчасъ дали дальнѣйшія указанія. Они показали, что перемѣщеніе, въ чемъ бы оно ни состояло по существу, должно быть поперечнымъ по отношенію къ лучу; они же позволили Френелю дать состоятельную теорію двойного преломленія, круговой и эллиптической поляризаціи.

Всѣ подробности этихъ прекрасныхъ изслѣдованій относятся собственно къ оптикѣ. Мы упомянемъ только о простѣйшихъ доказательствахъ интерференціи и поляризаціи темныхъ лучей—такъ какъ они именно представляютъ собою ключъ къ пониманію.

286. Физо и Фуко нашли, что всѣ обыкновенные опыты надъ интерференціей, каковы опыты съ зеркалами Френеля и обыкновенные диффракціонные опыты, удаются также съ темными лучами и указываютъ для нихъ, какъ и слѣдовало ожидать, на большую длину волны, чѣмъ у видимыхъ лучей.

Форбсъ былъ первый, нашедшій положительное доказательство поляризаціи темныхъ лучей. Форма употребленнаго имъ аппарата остается и теперь одною изъ лучшихъ для этой цѣли. Аппаратъ состоитъ главнымъ образомъ изъ толстой слюдяной пластинки, расколотой осторожнымъ нагрѣваніемъ на много чрезвычайно тонкихъ параллельныхъ слоевъ. Она помѣщается въ трубу подъ надлежащимъ угломъ къ оси и поляризуетъ проходящіе тепловые лучи точно такъ, какъ параллельная связка «покровныхъ стеклышекъ» микроскопа поляризуетъ свѣтъ. Когда двѣ такихъ трубы установлены концами одна къ другой между несвѣтящимъ источникомъ теплоты и термическимъ столбикомъ, то оказывается, что пока слюдяныя пластинки въ обѣихъ параллельны, значительное количество темныхъ лучей проходитъ чрезъ слюду. Количество проходящихъ лучей значительно уменьшается при поворачиваніи одной изъ трубъ вокругъ оси на прямой уголъ и приводится къ прежнему при дальнѣйшемъ поворачиваніи еще на прямой уголъ. Подобные же результаты, хотя и не столь явственные, были получены съ источниками, нагрѣтыми до самосвѣченія. Но

слюдящую связку приходилось помѣщать подь особымъ угломъ для каждой группы лучей, чтобы получить наибольшее дѣйствіе.

Прибавимъ еще, что электромагнитное вращеніе плоскости поляризаціи свѣта, открытое Фарадеемъ, обнаружено и по отношенію къ темнымъ лучамъ.

287. *Содержаніе §§ 275—286.* Лучистая теплота есть не что иное, какъ свѣтъ. Аналогія со звукомъ. Сравненіе видимыхъ и невидимыхъ лучей по скорости распространенія, отраженію, преломленію, поглощенію и т. д. Доказательства тождественности, доставляемые интерференціей и поляризаціей.

ГЛАВА XVII.

Излученіе и поглощеніе.

288. Присоединивъ къ замѣчаніямъ предыдущей главы еще указаніе на лучи меньшей длины волны, чѣмъ свѣтовые (которые изслѣдуются или съ помощью флюоресцирующихъ тѣлъ, или по дѣйствию ихъ на фотографическія пластинки), мы имѣемъ право говорить о лучеиспусканіи, какъ объ одномъ явленіи. Для изученія особенныхъ свойствъ лучей различной длины волны прилагаются особые экспериментальные приемы—вотъ и все. Но только термоэлектрическій столбикъ, котораго показанія не зависятъ отъ какихъ-либо особенныхъ нервовъ или особенныхъ химическихъ соединений (какъ въ случаѣ зрѣнія и фотографическихъ процессовъ), можетъ дать намъ сравнимые результаты по отношенію ко всякаго рода лучамъ.

289. Припомнимъ еще разъ явленія, представляемыя нагрѣтою проволокой (§ 277), мы можемъ теперь сказать, что такое тѣло испускаетъ лучи всѣхъ длинъ волнъ—отъ самыхъ длинныхъ до нѣкотораго предѣла, зависящаго отъ температуры тѣла. Чѣмъ выше темпе-

ратура, тѣмъ выше предѣлъ, и тѣмъ больше количество испускаемыхъ лучей, соответствующихъ каждой волнѣ болѣе длинной, нежели предѣльная.

290. Это позволить намъ понять, что лучеиспусканіе тѣла зависитъ только отъ *него самого* (т. е. отъ его состава, температуры, свойства его поверхности и т. д.) и, слѣдовательно, что равновѣсіе температуры, которое окончательно устанавливается между тѣлами въ помѣщеніи, не содержащемъ источника теплоты (§ 4), наступаетъ не вслѣдствіе того только, что болѣе теплыя тѣла посылаютъ лучи къ болѣе холоднымъ, но что всѣ тѣла одновременно лучеиспускаютъ, причемъ количество испускаемыхъ каждымъ тѣломъ лучей зависитъ отъ его природы, свойствъ поверхности и температуры. Разъ равновѣсіе достигнуто, оно поддерживается тѣмъ же самымъ процессомъ. Эта *теорія подвижнаго равновѣсія теплоты* (Theory of Exchanges) предложена въ послѣднемъ столѣтіи Превё (Prevost). Превё пришелъ къ ней, пытаясь объяснить такъ-называемое излученіе *холода*, какъ напр. въ томъ случаѣ, когда термометръ, находящійся въ теплой комнатѣ, падаетъ, если около его резервуара держать кусокъ льду.

Въ 1858 и 1859 годахъ Стиуартъ и Кирхгофъ очень расширили наши знанія въ этой области, какъ путемъ опыта, такъ и теоретически. Но ихъ главный результатъ въ значительной мѣрѣ былъ высказанъ еще раньше Стоксомъ, около 1850 г., при помощи динамической аналогіи.

[Въ непосредственно слѣдующемъ затѣмъ изложеніи мы будемъ предполагать, что всѣ опыты производятся *въ пустотѣ*. Это на дѣлѣ ограничиваетъ всѣ наши разсужденія твердыми тѣлами—ограниченіе, правда, важ-

ное; но за то оно освобождает насъ отъ всѣхъ усложненій, которыя могли бы произойти отъ переноса теплоты. Въ другой главѣ мы рассмотримъ дѣйствія одновременнаго излученія и переноса].

291. Уже Лесли и другіе хорошо знали, что количество лучей, испускаемое различными тѣлами при одной и той же температурѣ, очень измѣняется съ природой излучающей поверхности. Лесли, напримѣръ, устроилъ большой жестяной кубъ, котораго одна вертикальная сторона оставлена была блестящею, другая была сдѣлана матовою посредствомъ натиранія наждакомъ, третья закончена, а четвертая покрыта бѣлою эмалью. Когда кубъ былъ наполненъ горячей водою, тогда оказывалось, что блестящая поверхность испускала очень мало лучей, матовая значительно больше, но *гораздо* больше—объ другія, которыя (не смотря на различіе ихъ цвѣта) были въ этомъ отношеніи почти одинаковы. Количество лучей, испускаемыхъ полированнымъ и черною поверхностями, столь различно, что разницу можно прямо замѣтить на осязаніе, держа руку по очереди параллельно этимъ поверхностямъ въ разстояніи нѣсколькихъ дюймовъ.

292. Лесли и послѣ него болѣе полно Провостъ и Дезенъ дѣлали много экспериментальныхъ опредѣленій испускательной, поглощательной и отражательной способностей тѣлъ по отношенію къ группамъ темныхъ лучей многихъ различныхъ источниковъ. Эти опыты не могутъ претендовать на большую точность; но они въ общемъ показываютъ, что испускательная и поглощательная способности одного и того же тѣла пропорціональны другъ другу, между тѣмъ какъ отражательная способность уменьшается при одновременномъ увеличеніи первыхъ двухъ. Кажущіяся аномаліи, представляе-

мыя нѣкоторыми тѣлами, особенно въ ихъ сравнительной отражательной способности по отношенію къ темнымъ и свѣтлымъ лучамъ, препятствовали какимъ-либо широкимъ обобщеніямъ изъ этихъ опытовъ.

Предметъ въ цѣломъ, какъ мы нынѣ знаемъ, такъ тѣсно связанъ съ *началомъ обратимости* (§ 83) Карно, что каждый экспериментальный успѣхъ его долженъ быть разсматриваемъ съ этой обобщающей теоретической точки зрѣнія. И то же начало, съ вѣдома или безъ вѣдома для авторовъ, служило основаніемъ всѣхъ здравыхъ разсужденій о предметѣ. Но такъ какъ самое начало Карно (это будетъ показано позже) точно лишь въ «статистическомъ» смыслѣ, вслѣдствіе крайней малости частицъ матеріи сравнительно съ нашими инструментами для измѣренія температуры, то и всѣ выводы, которые мы можемъ сдѣлать изъ него, подвержены тому же самому ограниченію. Слѣдовательно, было бы напрасно, по крайней мѣрѣ при современномъ состояніи науки, ждать дѣйствительно *точно* изслѣдованія отношеній между испускающей, поглощающей и отражательной способностями. Во всѣхъ изслѣдованіяхъ, которыя принято считать точными, внимательный читатель откроетъ одинъ или болѣе пунктовъ, которые могутъ быть доказаны только статистическимъ приѣмомъ среднихъ чиселъ. Отчего же открыто не признать его силу и такимъ образомъ не сознаться въ томъ, что объясненіе не точно? Чтобы избѣжать ненужныхъ усложненій, никоимъ образомъ однако не теряя въ точности, мы приложимъ методъ, оказавшійся очень производительнымъ въ болѣе старыхъ частяхъ физики.

293. Когда въ элементарной динамикѣ мы разбираемъ условія равновѣсія рычага подъ дѣйствіемъ различ-

ныхъ силъ, мы въ замѣчательной степени упрощаемъ математическое разсмотрѣніе вопроса предположеніемъ, что нашъ рычагъ абсолютно твердъ. И мы приходимъ такимъ образомъ къ рѣшенію практически точному. Если рычагъ очень длиненъ или силы очень велики, то такое рѣшеніе недостаточно, ибо мы знаемъ по опыту, что рычагъ гнется. Но величину изгиба, если онъ не великъ, и его послѣдствія мы можемъ опредѣлить при помощи простой гипотезы относительно закона гнутія, а это, въ свою очередь, позволяетъ намъ получить и въ болѣе сложномъ случаѣ рѣшеніе достаточно точное для всѣхъ практическихъ цѣлей. Законъ Гука, законъ Кулона относительно тренія и т. д.—всѣ суть лишь приближенія къ истинѣ, основанныя на опытѣ, и употребляются нами съ цѣлью обойти какъ трудности теоріи, такъ и самой работы вычисленія. То же самое съ допущеніемъ совершенныхъ жидкостей и такихъ газовъ, которые точно слѣдуютъ закону Бойля. Мы не знаемъ до сихъ поръ ни совершенно твердаго тѣла, ни совершенной жидкости; но представленіе о такихъ тѣлахъ не затруднительно, а между тѣмъ значительно помогаетъ намъ упрощать наши изслѣдованія. Подобный же рядъ предположеній очень облегчитъ нашъ трудъ.

294. (1) Хотя нѣтъ вещества *совершенно прозрачнаго*—всѣ даже самыя прозрачныя тѣла являются болѣе или менѣе окрашенными въ достаточномъ толстомъ слоѣ и, слѣдовательно, поглощаютъ нѣкоторые изъ падающихъ на нихъ лучей, отражая или рассеивая въ то же время нѣкоторую часть ихъ — мы можемъ себѣ представить и употреблять для нашихъ разсужденій совершенно прозрачное и неотражающее тѣло. Каждый лучъ, свѣтлый

или темный, падающій на такое тѣло, проходить чрезъ него безъ потери.

(2) Свойства хорошо отполированной поверхности металлическаго серебра приводятъ насъ къ теоретическому представленію о поверхности съ *совершенною отражательною способностью*. Въ тѣло съ такою поверхностью не можетъ проникнуть ни одинъ лучъ.

(3) Подобнымъ образомъ кусокъ каменнаго угля или законченное тѣло приводятъ къ представленію о *совершенно черномъ тѣлѣ*. Каждый лучъ, падающій на такое тѣло, тотчасъ же поглощается. Такія тѣла не могутъ ни отражать, ни пропускать.

Тѣла, принадлежащія къ которой-нибудь изъ этихъ трехъ группъ, въ своихъ свойствахъ (поскольку мы ихъ здѣсь касаемся) совершенно тождественны.

(4) Толстая пластинка изъ синяго кобальтоваго стекла, пропускающая одну только группу лучей (красные), ведетъ къ представленію о тѣлѣ, которое *прозрачно для одного определенного луча и совершенно поглощаетъ всѣ другіе*.

(5) Нѣкоторыя соединенія дидимія и др. ведутъ къ представленію о тѣлѣ, которое *поглощаетъ одинъ определенный лучъ и пропускаетъ всѣ другіе*.

(6) Наконецъ, тонкій слой металлическаго серебра, какой напр. нынѣ употребляется для стеклянныхъ зеркалъ отражательныхъ телескоповъ, ведетъ къ представленію объ идеальномъ тѣлѣ, которое *прозрачно для одного определенного луча и совершенно отражаетъ всѣ другіе*.

Тѣла, принадлежащія къ которой-либо изъ трехъ послѣднихъ группъ, могутъ имѣть совершенно различныя свойства.

Возможность различныхъ другихъ сочетаній представляется сама собою; но названныя выше для насъ наиболѣе важны.

295. Возвращаясь къ нашему основному опытному факту, а именно, что всѣ тѣла въ непроницаемой для лучей оболочкѣ, въ которой нѣтъ источника теплоты, принимаютъ окончательно и удерживаютъ одну и ту же температуру (§ 4), мы видимъ, что состояніе каждаго тѣла совершенно не зависитъ отъ состоянія остальныхъ. Можно удалить любое число тѣлъ или ввести любое число новыхъ безъ нарушенія равновѣсія—предполагая, конечно, что всѣ они имѣютъ одну общую температуру. [Можно было бы думать, что совершенно отражающее тѣло представить исключеніе. Но если оно и его содержимое были первоначально при той же данной температурѣ, то тѣло сохранить эту температуру неопредѣленное время. На дѣлѣ его поверхность становится частью границы первоначальной оболочки, будучи въ то же время границею оболочки внутри оболочки]. Слѣдовательно, чрезъ каждый единичный элементъ поверхности внутри оболочки должно проходить перпендикулярно къ нему въ общемъ одно и то же количество лучей каждаго даннаго качества, для всѣхъ положеній и направленій элемента. Ибо результатъ не измѣнится отъ введенія еще какихъ бы то ни было тѣлъ при той же температурѣ. И такъ какъ одно изъ нихъ можетъ быть чернымъ тѣломъ, то излученіе въ общемъ (назовемъ его полнымъ излученіемъ) очевидно, должно быть равно испусканію чернаго тѣла при той же самой температурѣ. Это испусканіе состоитъ изъ безчисленнаго множества лучей, изъ которыхъ каждому соответствуетъ опредѣленная длина волны.

Сказанное содержитъ въ сущности всю теорію. Чтобы выяснитъ ея слѣдствія, мы должны теперь обратить вниманіе на одну изъ составляющихъ цѣлаго. Непосредственно противъ поверхности чернаго тѣла мы имѣемъ только лучи, испускаемые имъ, потому что такое тѣло не можетъ ни отражать, ни пропускать. Если мы теперь предположимъ, что между наблюдателемъ и чернымъ тѣломъ помѣщена пластинка изъ вещества (§ 294 при надлежащей температурѣ (температурѣ тѣла внутри оболочки), то ничего не должно измѣниться, даже по отношенію къ лучу той длины волны, для котораго именно пластинка непроницаема. Слѣдовательно, то, что она поглощаетъ съ одной стороны, она при данныхъ условіяхъ должна въ точности, количественно и качественно, испускать съ другой.

Для упражненія учащійся съ пользою можетъ самъ разобрать явленія, предположивъ пластинку изъ идеальныхъ веществъ (4) и (6) § 294. Пусть онъ сдѣлаетъ то же, предположивъ менѣе ограниченныя условія. И всякій разъ онъ придетъ къ одному и тому же общему результату. Чтобы его выразить, намъ нужны подходящіе термины.

Итакъ, сдѣлаемъ слѣдующія *опредѣленія*:

Испускательная способность тѣла для луча опредѣленной длины волны есть отношеніе этой части его излученія къ соотвѣтственной части излученія чернаго тѣла при той же самой температурѣ.

Поглощательная способность тѣла для луча опредѣленной длины волны есть дробь, показывающая, какая доля лучей этой длины волны, падающихъ на тѣло, имъ поглощается, причемъ остальная доля ихъ отражается, разсѣивается или пропускается. [Строго говоря, лучи,

о которыхъ здѣсь идетъ рѣчь, суть лучи, исходящіе отъ чернаго тѣла при той же температурѣ, какъ поглощающее тѣло; но мы дѣлаемъ вѣроятное предположеніе, что эти ограниченія не нужны].

При такихъ опредѣленіяхъ мы видимъ, что для всѣхъ тѣлъ

Испускательная и поглощательная способности при какой-либо температурѣ и для какой-либо определенной длины волны равны между собою.

296. Таково общее положеніе несомнѣнно истинное, какъ уже упомянуто, въ статистическомъ смыслѣ. Доказательство, которое мы дали или указали выше, было (во всѣхъ существенныхъ частяхъ) сообщено Стьюартомъ Единбургскому Королевскому Обществу въ мартѣ 1858 г. Его пріемъ съ теоретической стороны гораздо труднѣе только что даннаго и былъ примѣненъ главнымъ образомъ къ темнымъ лучамъ *). Еще труднѣе тотъ, который данъ былъ Кирхгофомъ въ 1859 году и послѣ него развитъ другими при помощи подавляющаго количества математическихъ символовъ. Но всѣ эти методы по существу не содержатъ больше, чѣмъ мы дали выше, и ихъ ненужная запутанность, ничего не прибавляя къ основательности доказательствъ, только мѣшаетъ читателю уловить тѣ сравнительно простыя, хотя и не строгія основы, на которыхъ окончательно построены всѣ доказательства.

297. Динамическая аналогія, данная Стоксомъ около 1850 г., была вызвана (какъ и изслѣдованія Кирхгофа) тѣмъ же явленіемъ, которое послужило исходною точкою *спектральнаго анализа*. Здѣсь мы должны нѣсколько уклониться въ сторону.

*) См. *Phil. Mag.* 1863, I. 354.

Въ 1817 г. Фраунгоферъ замѣтилъ, что пламя свѣчи, разсматриваемое помощью приѣма, который мы нынѣ называемъ спектроскопическимъ, показываетъ двойную *свѣтлую* черту въ оранжевой части, какъ разъ на томъ мѣстѣ, гдѣ въ солнечномъ спектрѣ приходилась двойная *темная* черта, которую Фраунгоферъ обозначилъ буквою D. Миллеръ (Hallowes Miller) помощью усовершенствованныхъ оптическихъ приѣмовъ нашелъ совпаденіе совершеннымъ. Фуко въ 1849 г. пошелъ дальше. Найдя ту же двойную свѣтлую черту въ спектрѣ вольтовой дуги, онъ изслѣдовалъ солнечный свѣтъ, пропущенный черезъ дугу, и къ своему удивленію нашелъ, что двойная темная черта сдѣлалась еще темнѣе, чѣмъ прежде. Тогда онъ помощью зеркала пропустилъ чрезъ дугу свѣтъ отъ одной изъ раскаленныхъ точекъ угольныхъ концовъ. Этотъ свѣтъ (отъ тѣла почти чернаго) самъ по себѣ даетъ сплошной спектръ, котораго нѣкоторыя части свѣтлѣе, чѣмъ другія. Но, будучи анализированъ послѣ прохожденія чрезъ дугу, онъ показалъ присутствіе темныхъ линій какъ разъ тамъ, гдѣ дуга сама по себѣ давала свѣтлыя.

298. Эти явленія Стоксъ объяснилъ помощью аналогіи изъ области звука. Представимъ себѣ пространство, содержащее много камертоновъ или фортепьянныхъ струнъ, настроенныхъ на одинъ тонъ. Приведенные въ колебаніе, они издавали бы этотъ одинъ тонъ. Но если мы станемъ по одну сторону нашего пространства, а въ то же время по другую сторону кто-либо будетъ играть на корнетъ-а-пистонѣ, то мы услышимъ (если не считать звуковъ, которые просто задерживаются препятствіемъ) всѣ тона, кромѣ того, на который настроены струны. Всѣ струны именно приводятся въ

колебаніе этимъ тономъ, котораго энергія такимъ образомъ значительно уменьшается. Итакъ, струны образуютъ собою среду, которая, будучи приведена въ колебаніе, надаетъ нѣкоторый опредѣленный тонъ, но въ то же время непроницаема именно для этого тона, если онъ исходитъ отъ вѣншнаго источника.

Это какъ разъ соотвѣтствуетъ равенству испускающей и поглощательной способностей для одной опредѣленной длины волны. И это, можетъ быть, есть тотъ самый механизмъ, который лежитъ въ основѣ всѣхъ явленій лучеиспусканія.

299. Всякое пламя, особенно въ мѣстахъ по близости моря, содержитъ малыя количества обыкновенной соли. И Сванъ доказалъ, что двойная свѣтлая черта, наблюдавшаяся Фраунгоферомъ въ пламени свѣчи, обуславливается именно присутствіемъ этого вещества. Отсюда изъ разсужденія Стокса слѣдовало, что появленіе двойной темной черты *D* въ солнечномъ спектрѣ должно обуславливаться солью или, лучше, парами металлическаго натрія, находящимися гдѣ-либо между солнечнымъ тѣломъ и землею.

Эта часть предмета, поскольку она относится къ свѣту, весьма искусно разработана Кирхгофомъ; но болѣе подробное разсмотрѣніе ея входитъ въ составъ сочиненій по *свѣту* и въ частности по *спектральному анализу*.

300. Вопросъ представляетъ еще одну частность, на которую, хотя она легко можетъ быть выведена изъ динамической аналогіи Стокса, впервые обратили вниманіе Стьюартъ и Кирхгофъ. Дабы могло произойти такъ-называемое *обращеніе*, т. е. дабы въ спектрѣ вмѣсто свѣтлой линіи получилась темная, температура погло-

щающей среды должна быть настолько ниже температуры источника, чтобы черное тѣло при этой низшей температурѣ испускало соотвѣтствующій лучъ въ *меньшей* степени, нежели источникъ. Это прямо слѣдуетъ изъ основного предложенія (§ 295) въ соединеніи съ тѣмъ фактомъ, что испусканіе темнымъ тѣломъ лучей какой-либо длины волны увеличивается съ повышеніемъ температуры (§ 277). То же самое можно вывести изъ общей теоріи § 295, предположивъ внутри оболочки только два тѣла, то и другое изъ *одного* матеріала (§ 294, но при различныхъ начальныхъ температурахъ.

Изслѣдованіе Кирхгофа непосредственно касалось отдѣльныхъ, опредѣленныхъ длинъ волнъ. Опытною проверкой результата служило то, что когда источникомъ былъ взятъ раскаленный кусокъ извести, а поглощающею средою пламя бунзеновской горѣлки, тогда обращенія натріевой линіи не происходило; но оно тотчасъ получалось, когда бунзеновская горѣлка была замѣняема спиртовой лампой.

Стьюартъ работалъ также со свѣтомъ; но онъ не ограничился (что легко могъ бы сдѣлать) одною опредѣленною длиною волны. Онъ показалъ, напримѣръ, что красное стекло становится безцвѣтнымъ въ огнѣ, когда температура стекла одинакова съ температурой угля позади него; что оно является *краснымъ*, когда позади находится болѣе горячій уголь, и *зеленымъ* (цвѣтъ дополнительный къ красному), когда уголь позади стекла менѣе горячъ, нежели стекло.

301. Въ объясненіяхъ § 295 мы не принимали въ соображеніе поляризаціи, одного изъ характеристическихъ явленій луча. Мы нарочно отложили это до дальнѣйшаго §, чтобы не сбить читателя. Но достаточно нѣсколькихъ

словъ, чтобы присоединить къ нашему разсмотрѣнію и это явленіе. Въ самомъ дѣлѣ, изъ тѣла внутри оболочки нѣкоторыя могутъ поляризовать чрезъ отраженіе, другіе чрезъ пропусканіе, какъ мы это знаемъ по отношенію къ свѣтовому лучу. Однако полное излученіе *должно быть повсемѣстно* одинаково—тождественно съ испусканіемъ чернаго тѣла—и, слѣдовательно, не можетъ быть поляризовано. (Если бы это было не такъ, то простое повертываніе чернаго тѣла въ новое положеніе измѣнило бы характеръ излученія внутри оболочки). Поэтому тѣло, которое поляризуетъ отраженные лучи въ одной какой-либо плоскости, должно въ томъ же направленіи испускать лучи, поляризованные въ плоскости перпендикулярной къ первой. Подобное же происходитъ съ турмалинной пластинкой, которая поляризуетъ чрезъ пропусканіе. Она поглощаетъ одинъ изъ поляризованныхъ лучей, происшедшихъ вслѣдствіе двойного преломленія; но, поглощая, она должна испускать именно этотъ поляризованный лучъ.

Этотъ прекрасный и важный примѣръ вѣрности общей теоріи былъ данъ, независимо другъ отъ друга, Кирхгофомъ и Стьюартомъ.

302. Примѣровъ, не столь просто и тѣсно связанныхъ съ теоріей, можно привести очень много. Мы возьмемъ лишь нѣсколько обыкновенныхъ, легко пробѣряемыхъ.

Если мы напишемъ что-либо чернилами на тонкой платиновой пластинкѣ и нагрѣемъ ее на несвѣтящемъ пламени, напр. на пламени большой паяльной лампы, то пластинка покроется въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ были чернила, тонкимъ темнымъ слоемъ окиси желѣза. Если пластинку нагрѣть очень сильно, то написанное на ней

явится свѣтлымъ на темномъ фонѣ, вслѣдствіе того, что это мѣсто испускаетъ больше, чѣмъ полированная поверхность. Но, испуская больше, эта часть платиновой пластинки остается постоянно холоднѣе, что можно видѣть, повернувъ написанное къ пламени: на обратной сторонѣ пластинки оказываются темныя буквы на свѣтломъ фонѣ.

Если нагрѣть на очень сильномъ огнѣ обломокъ фарфоровой или глиняной вещи съ темнымъ узоромъ на свѣтломъ фонѣ и рассмотреть потомъ въ темнотѣ, то окажется, что узоръ обращенъ (рис. 47). Очень поучи-

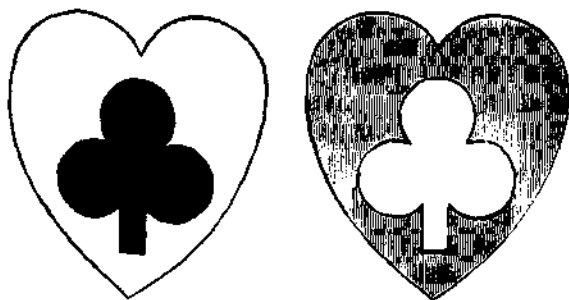


Рис. 47.

тельно нѣсколько разъ освѣтить его солнцемъ, пока обломокъ еще очень горячъ. Тогда можно попеременно видѣть прямой и обращенный узоры одинъ за другимъ.

Кусокъ каменнаго угля, нагрѣтый до высокой температуры, становится очень свѣтящимъ. Но расплавленная каменная соль при той же температурѣ едва видна въ темнотѣ. Одно есть тѣло почти черное, другое—почти прозрачное.

Если внутри оболочки находится раскаленное тѣло, отдѣленное отъ другого болѣе холоднаго экраномъ, то

въ окончательномъ результатѣ (если только экранъ не есть тѣло совершенно отражающее, въ каковомъ случаѣ мы имѣли бы два отдѣльныхъ помѣщенія) температуры, конечно, должны сравняться, какого бы рода ни были лучи, поглощаемые экраномъ. Поэтому, если бы экранъ былъ очень прозраченъ для темныхъ лучей (которые составляютъ далеко преобладающую часть всей испускаемой энергiи ¹⁾ и почти непрозраченъ для свѣтлыхъ, то болѣе холодное тѣло могло бы быть доведено до каленія прежде, чѣмъ экранъ сталъ бы испускать какіе-либо видимые лучи. Такъ, зажигательная линза изъ каменной соли лишь мало нагревается прямыми солнечными лучами, даже если ея поверхность закопчена; слѣдовательно, если она имѣетъ достаточное отверстіе, она можетъ нагревать тѣла, помѣщенные въ фокусѣ, до каленія, хотя и непрозрачна для видимыхъ лучей. Въмѣсто того, чтобы покрывать линзу сажею, мы можемъ удерживать большую часть свѣтлыхъ лучей посредствомъ крѣпкаго раствора іода въ сѣрнистомъ углеродѣ, какъ то предложилъ Debus. Требуется осторожность въ случаѣ, если растворъ помѣщается между линзою и нагреваемымъ тѣломъ. Акин и другіе полагали, что въ этомъ опытѣ мы имѣемъ явленіе противоположное флюоресценціи, т. е. что здѣсь характеръ луча повышается (уменьшается длина волны), тогда какъ при флюоресценціи всегда понижается. Но тутъ нѣтъ аналогія, ибо только что описанное явленіе есть слѣдствіе общаго предложенія (§ 295), тогда какъ флюоресценція представляетъ,

¹⁾ Это не относится безусловно ко всемъ тѣламъ. Излученіе солнца напр. состоитъ, по Ланглею, въ большей своей части изъ свѣта.

но крайней мѣрѣ, кажущееся исключеніе изъ этой теоріи. Слѣдуетъ, конечно, замѣтить, что теорія не прилагается *въ точности* къ этому явленію, потому что оно въ сущности связано съ состояніемъ, при которомъ тепловое равновѣсіе еще не достигнуто; теорія же вся основана на предположеніи теплового равновѣсія.

303. Во всемъ предыдущемъ мы для простоты предполагали, что испусканіе есть лишь поверхностное явленіе, какъ отраженіе или разсѣяніе. Последнія явленія никогда не совершаются внутри тѣла, кромѣ того случая, когда оно неоднородно; но тогда поверхности между различными частями тѣла можно разсматривать какъ новыя поверхности. Затѣмъ (кромѣ бѣлаго намека въ предыдущемъ §) мы опустили все относящееся до *флюоресценціи*.

Но одного взгляда на клинообразный кусокъ окрашеннаго стекла (если краска не нанесена только на поверхность стекла) достаточно, чтобы видѣть, что поглощеніе отнюдь не ограничивается поверхностью; слѣдовательно, мы можемъ ожидать, что испусканіе также будетъ исходить не только съ поверхности, но и изъ подъ нея. Стьюартъ доказалъ опытомъ, что излученіе толстой пластинки (изъ вещества не чернаго, не прозрачнаго) больше, чѣмъ излученіе тонкой пластинки изъ того же вещества при той же самой температурѣ¹⁾.

304. Очень простое вычисленіе позволить намъ показать вліяніе толщины на прямое излученіе пластинки. Пусть R означаетъ прямое излученіе опредѣленнаго рода, когда пластинка имѣетъ единичную толщину (единица можетъ быть взята произвольно малою), а α —со-

¹⁾ Подобные же опыты дѣлалъ Меллонн *Pogg. Ann.* LXV.

ответственную поглощательную способность для тѣхъ же лучей при той же определенной температурѣ. Тогда вторая пластинка, плотно приложенная къ первой, такъ, чтобы обѣ онѣ дѣйствовали какъ одна, будетъ тоже испускать R , но поглощать αR изъ лучей, испускаемыхъ первою пластинкой. Такимъ образомъ полное излученіе двойной пластинки будетъ

$$R [1 + (1 - \alpha)].$$

Третья пластинка, приложенная къ двумъ первымъ, прибавляетъ R и удерживаетъ $R\alpha [1 + (1 - \alpha)]$. Слѣдовательно, общее дѣйствіе трехъ пластинокъ будетъ

$$R [1 + (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2].$$

Законовъ очевиденъ; суммируя члены геометрической прогрессіи, мы найдемъ для излученія пластинки въ n единицъ толщиною

$$R \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{1 - (1 - \alpha)}.$$

Какъ бы мало ни было значеніе α , предполагая только, что оно не нуль, $(1 - \alpha)^n$ уничтожится при n равномъ безконечности. Это дастъ намъ наибольшее количество лучей, которое можетъ испускать масса вещества, и значеніе его равняется

$$\frac{R}{\alpha}.$$

Это количество, конечно, равно поглощательной способности вещества для соответствующихъ лучей, исходящихъ отъ чернаго тѣла той же самой температуры.

Поэтому, если α будет обозначать это совершенно определенное количество, мы имѣемъ

$$R = \alpha \alpha;$$

и предыдущее выраженіе для прямого испусканія пластинки въ n единицъ толщиною превращается въ

$$\alpha [1 - (1 - \alpha)^n] *).$$

Нижеслѣдующая табличка полезна въ томъ смыслѣ, что показываетъ слѣдствія изъ этого выраженія. Она даетъ значенія величины $1 - (1 - \alpha)^n$; соответствующія значенія α (т. е. значенія предыдущаго выраженія для $n=1$) находятся въ верхнемъ горизонтальномъ ряду, а значенія n —въ лѣвомъ столбцѣ. Числа таблицы можно, конечно, считать изображающими относительныя величины поглощенія при различныхъ толщинахъ пластинки. Ихъ недочетъ до единицы даетъ соответственныя величины пропусканія.

1	0,1	0,01	0,001	0,0001
10	0,651	0,096	0,010	0,001

*) Приведенное выше не строго, но достаточно для нашей цѣли. Чтобы сдѣлать изслѣдованіе строгимъ, мы можемъ поставить α/m вмѣсто α и mn вмѣсто n и затѣмъ принять m безконечнымъ. Мы можемъ поступить и такъ. Пусть R , α будутъ таковы, что пластинка толщиною δx при данной температурѣ испускаетъ $R\delta x$ лучей определенной длины волны и поглощаетъ $\alpha\delta x$ лучей той же длины волны, исходящихъ отъ чернаго тѣла. Если $\varphi(x)$ будетъ общее излученіе рассматриваемаго рода отъ пластинки, которой толщина x , то мы имѣемъ $\varphi(x + \delta x) = (1 - \alpha\delta x) \varphi(x) + R\delta x$, такъ что $\varphi'(x) = R - \alpha\varphi(x)$ и $\varphi(x) = \frac{R}{\alpha}(1 - e^{-\alpha x}) = \alpha(1 - e^{-\alpha x})$.

100	0,99997	0,634	0,095	0,01
1000	1,0	0,99996	0,632	0,095
10000	1,0	1,0	0,99995	0,632
100000	1,0	1,0	1,0	0,99995

305. Изъ даннаго выше выраженія вытекаетъ тотъ важный выводъ, что слой какого-либо вещества, какъ бы мала ни была его испускательная способность для отдѣльных лучей, если только онъ достаточно толстъ, дѣйствуетъ совершенно какъ черное тѣло. Ибо, по всей вѣроятности, всѣ извѣстныя вещества, будучи достаточно нагрѣты, испускаютъ всѣ лучи, хотя и въ весьма различныхъ количествахъ. Отсюда намъ становится понятнымъ, почему тѣло солнца, хотя вѣроятно газообразное (ибо бѣольшая часть составляющихъ его матеріаловъ во всякомъ случаѣ находятся при температурахъ далеко высшихъ, нежели ихъ критическія точки), лучеиспускаетъ такъ, какъ бы оно было чернымъ тѣломъ.

Другое важное заключеніе есть то, что тѣло, которое въ особенности сильно поглощаетъ нѣкоторые лучи предпочтительно предъ другими, можетъ удержатъ значительный процентъ лучей, падающихъ на него отъ чернаго тѣла, уже при самомъ началѣ; остальное можетъ затѣмъ пройти чрезъ значительную толщину, претерпѣвъ лишь сравнительно малую потерю.

Совершенно не то будетъ съ тѣломъ, которое не обладаетъ избирательнымъ поглощеніемъ, если бы даже оно было почти прозрачно; такое тѣло, взятое въ большой толщинѣ, почти непрозрачно.

306. Изъ данныхъ выше общихъ положеній ясно, что опытные опредѣленія, касающіяся даннаго предмета, могутъ быть или прямо дѣлаемы надъ излученіемъ ве-

щества, нагрѣтаго сильнѣе окружающихъ тѣлъ, или косвенно—надъ лучами, которые оно пропускаетъ отъ болѣе нагрѣтаго тѣла.

Такіе опыты, прямые или косвенные, сравнительно легки со свѣтлыми лучами, хотя и здѣсь есть одно непреодолимое затрудненіе, именно въ необходимости судить на глазъ объ относительной силѣ свѣта различной длины волны. Это собственно относится къ *фотометрии*, отрасли практической оптики. Мы только упомянемъ, что начало, на которомъ обыкновенно основываются, есть законъ уменьшенія силы лученспусканія съ увеличеніемъ разстоянія отъ свѣтящейся точки (§ 280). Каждымъ изъ двухъ сравниваемыхъ источниковъ освѣщаютъ часть экрана, и разстоянія ихъ отъ экрана такъ приравливаются, чтобы глазу обѣ части экрана казались освѣщенными одинаково. Но совершенно ясно, что оцѣнка, дѣлаемая этимъ путемъ, будетъ въ пользу лучей изъ середины видимой части спектра и въ ущербъ тѣмъ, которые лежатъ у его крайнихъ границъ.

То же вѣрно по отношенію ко всѣмъ фотографическимъ процессамъ. Каждому изъ нихъ отвѣчаетъ, какъ и въ случаѣ глаза, свой особенный промежутокъ (лежащій иногда выше видимаго спектра, иногда въ немъ, а иногда ниже), и лучи изъ середины промежутка въ особенности переоцѣняются. Истинное примѣненіе каждаго фотографическаго процесса есть собственно нахожденіе особыхъ областей очень сильнаго поглощенія. Единственно вѣрный методъ сравненія излученій весьма различной длины волны есть превращеніе лучей въ теплоту и измѣреніе количества теплоты, произведенной въ данное время. Это можно было бы сдѣлать въ совершенствѣ, если бы мы имѣли такія тѣла, какъ (6) въ § 294,

т. е. такіа, которыя прозрачны только для лучей определенной группы длинъ волнъ и совершенно отражаютъ всѣ остальные, и если бы мы могли довести нормальную температуру нашего термоэлектрическаго столбика или термометра до абсолютнаго нуля. Но эти условія неосуществимы, и мы должны пользоваться наименѣе ошибочнымъ методомъ изъ имѣющихся въ нашемъ распоряженіи.

307. Одинъ изъ такихъ методовъ основанъ на явленіи, которое было давно открыто Юнгомъ, когда онъ, возстановивъ *волнообразную теорію свѣта* Гюйгенса, развилъ ее помощью своего ученія объ *интерференціи*. Онъ показалъ, что если параллельный пучекъ бѣлаго свѣта отъ удаленнаго источника пропустить перпендикулярно чрезъ рѣшетку изъ равноотстоящихъ параллельныхъ проволокъ и потомъ принять на экранъ, то бѣлое пятно (которое получилось бы на экранѣ, еслибъ рѣшетки не было) ослабляется, а около него появляются ряды окрашенныхъ спектровъ. Спектры симметрично расположены по обѣ стороны отъ бѣлаго пятна, вдоль линіи перпендикулярной проволокамъ рѣшетки. Разстояніе каждаго отдѣльнаго цвѣта отъ центральнаго свѣтлаго пятна почти точно пропорціонально соответственной длинѣ волны. Оно также прямо пропорціонально разстоянію экрана отъ рѣшетки и обратно пропорціонально разстоянію между осями двухъ послѣдовательныхъ проволокъ. Если, по Ньютону, прибавить усовершенствованіе, состоящее въ узкой щели (параллельной проволокамъ), чрезъ которую свѣтъ направляется на рѣшетку, и ахроматическую линзу длиннаго фокуснаго разстоянія между рѣшеткой и экраномъ, то лучи различной длины волны могутъ быть столь совершенно от-

дѣлены другъ отъ друга, что съ солнечнымъ свѣтомъ ясно видны главныя Фраунгоферовы линіи.

Распредѣленіе энергій въ такомъ спектрѣ можетъ быть прямо изучено посредствомъ термоэлектрическаго столбика, всѣ спая котораго для этого располагаются въ одной линіи параллельно проволокамъ рѣшетки. Помѣщенный гдѣ-либо на экранѣ, онъ даетъ, по отклоненію гальванометра, мѣру количества энергій первоначальныхъ лучей между двумя длинами волнъ, которыя различаются на величину пропорціональную *ширинѣ* столбика. Можно устроить такъ, чтобы столбикъ, оставаясь по длинѣ параллельнымъ проволокамъ рѣшетки, передвигался вдоль всего спектра помощью винта.

308. Противъ этого метода можно сдѣлать много возраженій.

(1) Наибольшая напряженность спектральныхъ лучей составляетъ необходимымъ образомъ лишь весьма малую долю всего излученія.

(2) Длина спектровъ видимыхъ лучей необходимо будетъ очень мала, ибо для нашей настоящей цѣли мы должны дѣйствительно употреблять проволоки или что либо подобное—а мы не можемъ имѣть ихъ болѣе ста или около того на дюймъ.

Въ такомъ случаѣ, если бы разстоянія щели и экрана отъ рѣшетки составляли бы даже по двадцати футовъ, наибольшее отклоненіе красной части перваго спектра отъ центральной линіи равнялось бы двумъ третямъ дюйма.

[Рѣшетки, употребляемыя для оптическихъ цѣлей, могутъ имѣть многія тысячи линій на дюймъ; но къ ихъ тепловымъ показаніямъ должно относиться съ осторожностью, такъ какъ эти рѣшетки обыкновенно состоятъ

изъ линій, начерченныхъ алмазомъ на стеклѣ или зеркальномъ металлѣ; и различныя группы темныхъ лучей могутъ весьма различно (другъ отъ друга) измѣняться при прохожденіи черезъ стекло или при отраженіи отъ металла. Напримѣръ, такія рѣшетки хорошо указываютъ отдѣльныя мѣста сильнаго поглощенія (какъ Фраунгоферовы линіи); когда же онѣ ослабляютъ значительную часть спектра, тогда требуется дополнительная провѣрка.

(3) Такъ какъ столбикъ подвергается дѣйствію *всѣхъ* лучей, а не однихъ лишь видимыхъ, то дѣйствіе на него въ какомъ-либо положеніи обусловлено лучемъ определенной длины волны изъ перваго спектра, лучемъ половинной длины волны изъ втораго спектра и т. д.

(4) Сказанное выше относится только до лучей такой длины волны, которая значительно менѣе разстоянія между осями двухъ послѣдовательныхъ проволокъ. При болѣе длинныхъ волнахъ явленіе принимаетъ другой характеръ.

(5) Сравненіе въ различныхъ частяхъ спектра должно бы дѣлаться между такими группами длинъ волнъ, которыхъ крайнія имѣютъ одно и то же *отношеніе* въ каждой группѣ; между тѣмъ при нашемъ методѣ мы имѣемъ дѣло съ группами, въ которыхъ крайнія *разности* одинаковы, и такимъ образомъ отдаемъ недостоверное предпочтеніе болѣе короткимъ волнамъ.

309. Если вмѣсто дифракціоннаго спектра мы возьмемъ призматическій, то мы встрѣчаемся съ нѣсколькими иными, почти подавляющимъ рядомъ затрудненій. Нѣкоторыя изъ нихъ, вѣроятно, могутъ быть устранены при помощи новѣйшихъ усовершенствованій въ фотографіи, которыя нынѣ позволяютъ намъ пользоваться темными

лучами бóльшей длины волны, нежели красные, какъ въ прежнихъ методахъ употреблялись главнымъ образомъ темные лучи меньшей длины, чѣмъ фіолетовые.

(1) Мы должны имѣть особенныя средства для опредѣленія поглотительной способности матеріала нашей призмы для темныхъ лучей каждой длины волны. Мы не можемъ довѣрять даже такому веществу, какъ каменная соль, безъ прямого доказательства, что она не обладаетъ поглотительною способностью по отношенію къ какой-нибудь опредѣленной части спектра.

(2) Допустивъ даже, что такое доказательство имѣется, мы встрѣчаемся съ весьма важнымъ затрудненіемъ, которое состоитъ въ томъ, что менѣе преломляемые лучи сплочиваются другъ съ другомъ по неизвѣстному еще закону. По отношенію къ свѣту мы знаемъ, съ грубою степенью приближенія, что показатель преломленія прозрачнаго тѣла можетъ быть представленъ формулой

$$\mu = A + \frac{B}{\lambda^2},$$

гдѣ λ есть длина волны, A и B особыя постоянныя для каждой среды. Если этотъ законъ даже приблизительно примѣнимъ къ длинамъ волнъ, значительно превосходящимъ тѣ, которыя соотвѣтствуютъ видимымъ лучамъ, то должно быть множество лучей, которыхъ показатель преломленія практически одинъ и тотъ же; и напряженность всего лучеиспусканія въ данной части длины спектра должна постоянно возрастать (въ предположеніи, что здѣсь нѣтъ какого-либо особеннаго поглощенія) до нѣкотораго предѣла, для котораго $\mu = A$. Но на дѣлѣ оказалось невозможнымъ избѣжать *разсплывія*, какъ бы тщательно ни было выбрано вещество для призмы

и какъ бы точно по плоскости ни были отшлифованы ея грани.

Затѣмъ должно еще замѣтить, что показанія столбика соотвѣтствуютъ лишь избытку лучей, падающихъ на него, надъ тѣми, которые имъ теряются. Такимъ образомъ всѣ его показанія ошибочны, и тѣмъ болѣе, чѣмъ выше его средняя температура.

Можно было бы указать еще на многія другія затрудненія, но достаточно и названныхъ выше.

310. Послѣ сдѣланныхъ только что замѣчаній читатель не удивится, когда увидить, что наши положительныя знанія по данному предмету, по крайней мѣрѣ въ отношеніи темныхъ лучей, еще очень скудны, и что даже имѣющіяся у насъ общія указанія имѣютъ нѣсколько сомнительный характеръ.

Были сдѣланы попытки изобразить графически напряженность видимыхъ лучей въ каждой точкѣ спектра. Результаты ихъ, однако, всѣ не достовѣрны по причинѣ упомянутой выше (§ 306) трудности—судить объ относительной силѣ свѣта лучей различной окраски. Всѣ согласны въ томъ (съ исключеніемъ для нѣкоторыхъ «слѣпыхъ на цвѣта»), что максимумъ лежитъ гдѣ-либо въ желтой части, но (какъ и можно было ожидать) болѣе точнаго согласія на этотъ счетъ не имѣется.

В. Гершель первый указалъ на то, что самая теплая часть солнечнаго спектра (найденная помощью термометра) не только не совпадаетъ съ самою свѣтлою, но расположена неодинаково по отношенію къ свѣтлой части, смотря по матеріалу призмы. Въ самомъ дѣлѣ, она лежитъ въ предѣлахъ видимаго спектра, если взять воляющую призму, и внѣ его, а именно по ту сторону красной части, если призма сдѣлана изъ каменной соли. При-

чина, очевидно, та, что каменная соль прозрачна, а вода непрозрачна для темных лучей.

311. Меллони, Форбсъ и другіе пробовали обойти нѣкоторыя трудности задачи другимъ путемъ, а именно измѣряя непосредственно количество лучей, поглощаемыхъ какимъ-либо однимъ тѣломъ отъ ряда источниковъ различной температуры, напр. куба Лесли (§ 291), зачерненной мѣди при 200°C , 400°C и т. д., лампы Локателли, платиновой спирали, раскаленной до-бѣла, и т. д. Но всѣ такія наблюденія представляютъ сравнительно мало интереса, если мы взглянемъ на нихъ съ точки зрѣнія, на которую наводятъ насъ свойства окрашеннаго стекла. Оказывается, что ничтожная повидимому примѣсь посторонняго вещества (кобальта, марганца, золота и др.) совершенно измѣняетъ свойства стекла по отношенію къ видимымъ лучамъ. Нѣтъ сомнѣнія, что то же распространяется, по меньшей мѣрѣ въ одинаковой степени, и на отношеніе тѣлъ къ темнымъ лучамъ. Послѣ этого мы не можемъ ожидать — какъ оно и есть на дѣлѣ — полного согласія между результатами, добытыми разными экспериментаторами, если они не работали не только съ однимъ и тѣмъ же веществомъ, но съ однимъ и тѣмъ же образцомъ его, по крайней мѣрѣ, когда вопросъ касается естественнаго, а не искусственнаго продукта.

312. Когда вещества могутъ быть получены химически чистыми, мы естественно можемъ ждть большаго согласія между независимыми результатами отдѣльныхъ экспериментаторовъ. Такъ всѣ изслѣдователи повидимому согласны въ томъ, что вода и водные растворы (въ особенности растворъ квасцовъ) особенно непрозрачны для болѣе низкихъ темныхъ лучей. Существуетъ также хорошее согласіе по отношенію къ газамъ; нѣ-

которые (какъ напр. сухой воздухъ) оказываются весьма мало поглощающими темные лучи вообще, другіе (какъ маслородный газъ), напротивъ, сильно поглощаютъ именно эти лучи. Предметъ былъ тщательно изученъ Тиндалемъ. Мы, конечно, подготовлены къ такимъ различіямъ, такъ какъ намъ извѣстны *окрашенные* газы, напр. хлоръ и въ особенности азотноватая окись, которая (какъ показалъ Брюкстеръ) можетъ быть сдѣлана почти совершенно непрозрачною для солнечнаго свѣта, даже въ слѣдъ небольшой толщины, если ее достаточно нагрѣть.

313. Но по отношенію къ парамъ вопросъ никоимъ образомъ не рѣшенъ столь опредѣленно. Нѣтъ сомнѣнія, что даже малое количество воды въ воздухѣ значительно повышаетъ его поглощательную способность по отношенію къ темнымъ лучамъ. Но мы не знаемъ еще, имѣетъ ли это поглощеніе избирательный или общій характеръ. Болѣе того: еще не показано съ опредѣленностью, чтобы все дѣйствіе обуславливалось *парами* воды. Всѣ мы знаемъ, какого небольшого облака или тумана достаточно, чтобы значительно ослабить блескъ солнца, причемъ задерживаются и тепловые, и свѣтовые лучи. Это до нѣкоторой степени можно приписать просто отраженію и т. д. отъ маленькихъ водяныхъ капель. Но если мы попробуемъ сдѣлать грубую оцѣнку яркости облака, освѣщеннаго солнцемъ, предположивъ, что облако отбрасываетъ на половину шаровой поверхности то количество свѣта, которое оно получаетъ отъ солнца (диска съ радіусомъ въ $0^{\circ},25$), то яркость его въ этомъ предположеніи относилась бы къ яркости солнца, приблизительно, какъ 1 : 120000. Это почти соответствовало бы предположенію, что еслибъ все небо было покрыто облаками той яркости, какъ при полномъ солнечномъ освѣ-

щеніи, то мы получали бы то же самое количество свѣта, какъ прямо отъ солнца. Однако, такая оцѣнка значительно *выше* дѣйствительности. Ибо, хотя облака и кажутся немного свѣтлѣе луны, отношеніе свѣта полнолунія къ солнечному, данное Гершелемъ (по Уольстону), составляетъ лишь около 1 : 800000. Такимъ образомъ, облако должно отражать лишь около $\frac{1}{3}$ или $\frac{1}{4}$ всѣхъ падающихъ на него лучей. Бѣольшая часть остальныхъ поглощается имъ.

Непосредственное тепловое излученіе солнца сильно чувствуется даже тогда, когда воздухъ насыщенъ водяными парами, какъ напр. въ моменты проясненія неба при перерывахъ сильнаго ливня. Но ливень удалилъ изъ воздуха, по крайней мѣрѣ въ значительной степени, ту мелкую пыль, которая служитъ ядромъ для сгущенія паровъ (§ 176); и повидимому такой насыщенный парами воздухъ тотчасъ сдѣлался бы почти непроницаемымъ для солнечнаго тепла, если бы примѣсь небольшого количества пыли вызвала образованіе тумана или облаковъ. Мы должны еще имѣть въ виду то, что дождевое облако есть вершина восходящаго столба теплаго влажнаго воздуха и что, *следовательно*, промежутокъ между двумя облаками содержитъ, въ бѣольшей своей части, столбъ нисходящаго бѣолѣе сухого воздуха.

314. Поглощеніе, обусловленное настоящимъ водянымъ паромъ, въ качественномъ и количественномъ отношеніяхъ, есть вопросъ, особенно досаждавшій въ послѣднія двадцать лѣтъ и до сихъ поръ остающійся нерѣшеннымъ. Съ опредѣленностью можно сказать только то, что настоящий водяной паръ навѣрное прозрачѣе для темныхъ лучей въ ихъ цѣломъ, нежели маслородный газъ, и, вѣроятно, менѣе прозраченъ, чѣмъ сухой

воздухъ. Онъ, вѣроятно, поглощаетъ главнымъ образомъ нѣкоторые *опредѣленные* темные лучи. Этотъ вопросъ, надо полагать, можетъ быть рѣшенъ при помощи недавняго открытія Абнея (Abney), дающаго намъ средство фотографировать темные лучи. Если бы поглощающая (и слѣдов. испускающая) способность водяного пара была сколько нибудь близка къ поглощающей способности маслянистаго газа, то на дѣлѣ не было бы разницы между количествами росы, выпадающей послѣ ясной ночи и послѣ пасмурной; ибо если ночь была ясна и воздухъ почти сухъ, то произошло бы значительное охлажденіе почвы, но имѣлось бы мало влаги для образованія росы; если же воздухъ былъ влаженъ, то было бы много матеріала для образованія росы, но незначительное охлажденіе. Результаты Уельса въ сущности не зависятъ отъ поглощенія, обуславливаемого настоящимъ водянымъ паромъ *). Большую разницу въ дѣйствіи настоящаго пара и облака или тумана можно прямо видѣть, если прослѣдить за паромъ, выбрасываемымъ изъ трубы паровоза. На протяженіи нѣсколькихъ футовъ отъ отверстія паръ прозраченъ, но дѣлается почти совершенно непрозрачнымъ, какъ только происходитъ его сгущеніе.

315. Есть еще разрядъ явленій, о которыхъ упоминалось выше и о которыхъ слѣдуетъ здѣсь сказать, хотя эти явленія до сихъ поръ наблюдались (таковы они по существу) только въ связи съ видимыми лучами и поэтому относятся собственно къ сочиненіямъ по *свету*. Явленія эти называются *флюоресценціей* и *фосфоресценціей* и представляютъ, вѣроятно, видоизмѣненія одного и того же явленія.

*) W. Thomson, *Proc. P. S. E.*, v. 203 (1864).

Подъ *фосфоресценціей* разумѣютъ нѣчто весьма отличное отъ свѣченія (въ темнотѣ) куска фосфора или черты, проведенной имъ по стѣнѣ; отъ свѣченія гнилого дерева или сухой рыбы. Послѣднія явленія обусловливаются, вѣроятно, медленнымъ окисленіемъ или другимъ химическимъ соединеніемъ и поэтому относятся къ явленіямъ горѣнія. Но уже древнимъ было извѣстно, что нѣкоторые драгоценные камни, будучи нагрѣты, продолжаютъ свѣтитъ въ темнотѣ долго послѣ того, какъ они охладились до температуры воздуха. Свойства болонскаго камня (сѣрнистый барій) было открыто въ семнадцатомъ столѣтіи, а Кантонова фосфора (сѣрнистый кальцій) — въ восемнадцатомъ. И въ настоящее время мы знаемъ многія разновидности хлористыхъ, сѣристыхъ и др. соединений, которыя, подобно только что названнымъ препаратамъ, цѣлыми часами ярко свѣтятся въ темнотѣ послѣ того, какъ они были выставлены на солнечный свѣтъ или освѣщены горячей магніевой проволокой. Въ послѣднее время эти вещества были приняты для различныхъ цѣлей, какъ *свѣтящія краски*. Любопытное явленіе, представляемое ими, правильно называется фосфоресценціей.

Нѣкоторые кристаллы зеленоватаго плавиковога шпата, кусокъ стекла, окрашеннаго окисью урана (saphy glass), отваръ коры конскаго каштана (эскулинъ) и подкисленный растворъ сѣрнокислаго хирина показываютъ особенные цвѣта на поверхности уже при обыкновенномъ дневномъ свѣтѣ, гораздо сильнѣе въ солнечномъ и электрическомъ. Блестящее изслѣдованіе Стокса въ 1852 г. показало, что это обусловливается измѣненіемъ свѣтовыхъ лучей, поглощаемыхъ тѣломъ, и испусканіемъ такихъ измѣненныхъ лучей; самый мемуаръ Стокса

озаглавленъ: *Объ измѣненіи преломляемости свѣта*. Это явленіе правильно называется флюоресценціей. Во всѣхъ случаяхъ длина волны испускаемыхъ лучей больше, чѣмъ длина волны поглощенныхъ.

Флюоресценція отличается отъ фосфоресценціи главнымъ образомъ тѣмъ, что длится гораздо короче. Но за описаніемъ фосфороскопа и результатовъ, полученныхъ съ его помощью, мы должны отослать къ сочиненіямъ по свѣту.

316. Механизмъ этого кажущагося накопленія и последующей отдачи свѣта остается еще нѣсколько темнымъ, а гипотезы, предложенныя Стоксомъ и другими, было бы слишкомъ трудно разсматривать здѣсь, особенно въ смыслѣ общаго предложенія (§ 295).

Мы лишь еще разъ ссылаемся на важныя ограниченія (§ 292), при которыхъ принимается вся теоретическая часть предмета, и отмѣчаемъ кажущееся противорѣчіе между двумя положеніями: а) что испусканіе даннымъ тѣломъ какого-либо опредѣленнаго луча зависитъ только отъ температуры тѣла и б) что нѣкоторые флюоресцирующія тѣла испускаютъ видимые лучи при такихъ температурахъ, при которыхъ даже черное тѣло испускало бы одни только темные лучи.

317. *Содержаніе §§ 288—316.* Теорія «подвижнаго равновѣсія» Прево. Излученіе въ зависимости отъ природы поверхности. Распространеніе теоріи Прево. Общее соотношеніе между испускательною и поглощательною способностями. Физическая аналогія. Спектральный анализъ. Внутреннее излученіе. Поглощеніе пластинками разной толщины. Распредѣленіе энергіи въ спектрѣ. Поглощеніе газами и парами. Флюоресценція и фосфоресценція. Недостатки теоріи.

ГЛАВА XVIII.

Излученіе.

318. До сихъ поръ мы занимались главнымъ образомъ отношеніемъ между поглощательною и испускательною способностями тѣла или тѣлъ при одной определенной температурѣ. И мы пользовались, по крайней мѣрѣ отчасти, теоретическими соображеніями.

Но за свѣдѣніями объ относительной величинѣ испусканія и поглощенія для одного и того же тѣла *при различныхъ температурахъ*—идеть-ли дѣло о всѣхъ лучахъ вмѣстѣ взятыхъ, или ограничивается одною определенной длиною волны—мы должны обратиться непосредственно къ опыту. Механическихъ аналогій, которыя оказали намъ значительную помощь въ первой части работы, здѣсь нѣтъ, вслѣдствіе нашего незнанія природы колебательныхъ движеній частицъ нагрѣтаго тѣла и способа, какимъ передается ихъ энергія эфиру. Въ этомъ отношеніи мы знаемъ только то, что повышение температуры излучающаго тѣла сопровождается увеличеніемъ его испускательной способности по отношенію къ лучамъ всѣхъ родовъ. Мы еще не знаемъ,

можетъ ли считаться это увеличеніе приблизительно одинаковымъ для лучей всѣхъ длинъ волнъ или нѣтъ.

319. Напомнимъ, что здѣсь мы будемъ разсматривать только испусканіе, а не полное излученіе, которое, какъ мы видѣли, одинаково для всѣхъ тѣлъ въ нашемъ воображаемомъ помѣщеніи. Для черныхъ тѣлъ оно все заключается въ испусканіи. Для другихъ же — частью въ испусканіи, частью въ пропусканіи, частью въ отраженіи. Для простоты мы поэтому ограничимся сперва черными тѣлами. И чтобы удобнѣе было примѣнить теорію подвижнаго равновѣсія Прево, предположимъ въ нашей оболочкѣ два черныхъ тѣла, и только эти два, при различныхъ температурахъ. Далѣе, чтобы по возможности приблизиться къ условіямъ, осуществимымъ въ дѣйствительности, мы предположимъ, что болѣе холодное черное тѣло *выстываетъ* оболочку, а болѣе теплое подвѣшено внутри нея. Эти условія мы почти имѣемъ въ случаѣ термометра съ очень большимъ зачерненнымъ резервуаромъ, находящагося въ оболочкѣ, изнутри зачерненной и изъ которой удаленъ воздухъ: въ такой формѣ опытъ легко можетъ быть выполненъ. Для устранения трудностей, происходящихъ отъ переноса теплоты и т. д. въ жидкости термометрическаго резервуара, мы можемъ предположить, что зачерненное тѣло есть большой шаръ, сдѣланный изъ хорошо проводящаго теплоту металла, съ углубленіемъ, содержащимъ ртуть, въ которую погруженъ резервуаръ обыкновеннаго термометра; стержень термометра совершенно плотно проходитъ чрезъ оболочку. Если оболочка также сдѣлана изъ хорошо проводящаго металла, то мы можемъ предположить, что она удерживается при неизмѣнной температурѣ, и что для этого она погружена въ боль-

шой сосудъ съ водою, въ которомъ вода постоянно возобновляется изъ водоема. Шаръ нагрѣваютъ, вставляютъ вмѣстѣ съ термометромъ въ оболочку и, какъ можно скорѣе, производятъ пустоту. Показанія термометра отмѣчаются (какъ въ § 180) каждую минуту. Шаръ вмѣстѣ со ртутью и резервуаромъ термометра приведенъ къ водѣ надлежащими способами, такъ что мы можемъ вычислить количество единицъ теплоты, принимаемыхъ соотвѣтственно наблюденному паденію температуры. Это число, раздѣленное на число квадратныхъ единицъ поверхности шара, даетъ потерю теплоты испусканіемъ на каждую единицу поверхности въ минуту при каждой изъ наблюденныхъ температуръ.

320. Пусть абсолютная температура шара будетъ t , оболочки t_0 , и пусть $f(t)$ представляетъ быстроту потери теплоты единицею поверхности при температурѣ t ; тогда количества, вычисляемые такимъ образомъ изъ опыта, будутъ послѣдовательными значенія разности

$$f(t) - f(t_0).$$

321. Прежнія теоретическія соображенія относительно этого предмета, включая сюда и тѣ, которыя принадлежатъ Ньютону, предполагали, что это количество просто пропорціонально разности температуръ

$$t - t_0,$$

такъ что для всѣхъ температуръ

$$f(t) = At + B,$$

гдѣ A и B —постоянныя. Это предположеніе содержится (даже тамъ, гдѣ участвуютъ явленія переноса теплоты)

во всѣхъ теоретическихъ сочиненіяхъ Фурье. И оно оказывается приблизительно вѣрнымъ, пока разность температуръ не болѣе нѣсколькихъ градусовъ.

322. Дюлонъ и Пти весьма тщательнымъ рядомъ опытовъ нашли, что это предположеніе ошибочно (именно даетъ недочетъ въ результатѣ) даже для умѣренныхъ разностей температуръ, и что процентная величина погрѣшности быстро возрастаетъ съ увеличеніемъ этихъ разностей. Они нашли, что результаты ихъ опытовъ, по крайней мѣрѣ для разностей до 200° C, когда оболочка имѣла температуру отъ 0° до 80° , могли быть хорошо представлены показательною формулою вида

$$f(t) = A\alpha^t + B.$$

Количество A зависитъ только отъ природы излучающей поверхности; количество $\alpha=1,0077$, согласно этимъ опытамъ, можетъ считаться одинаковымъ для всѣхъ тѣлъ. [B не можетъ быть, конечно, найдено опытомъ; но оно равнялось бы $-A$, еслибъ формула была справедлива для всѣхъ температуръ до абсолютнаго нуля, ибо, очевидно, излученія нѣтъ, когда $t=0$].

323. Провостъ и Дезенъ подтвердили слѣдствія изъ этой формулы отъ 0° до 200° C; но они нашли, что выше этой послѣдней температуры формула болѣе непримѣнима.

Простота выраженія и въ особенности то, что α оказалось почти одинаковымъ независимо отъ природы излучающей поверхности — все это подаетъ поводъ думать, что самое выраженіе можно бы вывести теоретически; но мы еще не имѣемъ свѣдѣній о механизмѣ испусканія, чтобы на нихъ основать теорію.

324. Принявъ однако это выраженіе, какъ отвечаю-

щее хорошо опытнымъ даннымъ въ обозначенныхъ пределахъ, мы находимъ для быстроты поверхностной потери

$$f(t) - f(t_0) = Aa^{t_0} (x^{t-t_0} - 1).$$

Мы имѣемъ такимъ образомъ приближительныя положенія:

Для данной температуры оболочки быстрота поверхностной потери пропорціональна

$$(1,0077)^{\theta} - 1,$$

гдѣ θ — разность температуръ въ градусахъ С.

Для данной разности температуръ быстрота поверхностной потери пропорціональна

$$(1,0077)^{t_0},$$

гдѣ t_0 — абсолютная температура оболочки.

Слѣдовательно, эта потеря для равныхъ приращеній температуры возрастаетъ въ геометрической прогрессіи.

325. Первый изъ этихъ результатовъ показываетъ, что быстрота охлажденія для умеренныхъ разностей температуры пропорціональна

$$\theta (1 + 0,0038 \theta + \dots).$$

мы видимъ отсюда степень приближенія такъ-называемаго закона Ньютона. Погрѣшность его (а именно нености температуръ) составляетъ около 4% для разности температуръ въ 10°C¹⁾.

¹⁾ Новый законъ зависимости излученія отъ температуры данъ былъ Стефаномъ (I. Stefan). По этому закону испусканіе чернаго тѣла пропорціонально четвертой степени абсолютной температуры. Затѣмъ Больцманъ указалъ, что тотъ же законъ при-

Мы не имѣемъ достаточно опредѣленныхъ свѣдѣній о дѣйствительномъ значеніи величины A . По опытамъ Гопкинса она составляетъ около $\frac{1}{6}$ единицы теплоты въ минуту на каждый квадратный футъ для поверхности стекла. Отсюда слѣдуетъ, что излученіе стекла при 100°C къ оболочкѣ при 0° составляетъ около одной единицы теплоты на квадратный футъ въ минуту.

326. Хотя законъ Дюлона и Пти оказался вѣрнымъ въ значительномъ промежуткѣ температуръ и для всякихъ поверхностей, онъ не примѣнимъ даже приблизительно для каждой отдѣльной длины волны. Если бы это было такъ, то характеръ излученія отъ чернаго тѣла (т. е. отношеніе, въ которомъ общая энергія распределена между различными длинами волнъ) былъ бы одинъ и тотъ же во всемъ промежуткѣ температуръ. Такимъ образомъ, процентное количество лучей, которое поглощается даннымъ тѣломъ отъ всѣхъ черныхъ источниковъ при температурахъ въ этомъ промежуткѣ, должно бы быть одинаково. Это не согласуется съ большинствомъ результатовъ Меллони. Такъ онъ нашелъ слѣдующее процентное поглощеніе теплоты отъ различныхъ источниковъ пластинками одинаковой толщины при обыкновенныхъ температурахъ:

	Зачерненная мѣдь при 100°C и 400°C		Раскал. платина.	Лампа Докателли.
Каменная соль.	8	8	8	8
Плавиковый шпатъ	67	58	31	22
Исландскій шпатъ.	100	94	72	61
Квасцы	100	100	98	91.

но можетъ быть выведенъ теоретически изъ понятій, введенныхъ Максвелломъ въ теорію свѣта.

Для сравненія мы прибавили еще два источника, изъ которыхъ, по крайней мѣрѣ, одинъ навѣрное не есть черное тѣло.

327. Даже такая краткая таблица ставитъ повидимому внѣ всякаго сомнѣнія (по крайней мѣрѣ, насколько можно довѣрять теоретическимъ выводамъ гл. XVII), что величина испусканія каждого особаго луча чернымъ тѣломъ, послѣ того, какъ испусканіе стало только что замѣтнымъ, возрастаетъ съ повышеніемъ температуры быстрѣе и быстрѣе, а потомъ, при дальнѣйшемъ повышеніи температуры, медленнѣе и медленнѣе.

[Желательно было бы—и это легко осуществимо при современныхъ аппаратахъ—имѣть рядъ тщательныхъ опытовъ подобныхъ опытамъ Меллони, сдѣланныхъ съ однимъ и тѣмъ же зачерненнымъ тѣломъ, какъ источникъ, ваятымъ послѣдовательно при температурахъ на 50° , 100° , 150° . . . 500°C выше, чѣмъ температуры поглощающей пластинки и столбика. Такой рядъ опытовъ для нѣсколькихъ хорошо выбранныхъ поглощающихъ пластинокъ имѣлъ бы высокое научное значеніе].

328. Мы должны здѣсь привести одно очень любопытное соображеніе (Бальфуръ Стьюарта), которое, вѣроятно, вслѣдствіе нѣкоторыхъ неточностей въ первоначальномъ его изложеніи, не встрѣтило того вниманія, какого оно, безъ сомнѣнія, заслуживаетъ. Оно основано на такъ называемомъ *началѣ Денлера*, представляющемъ лишь приложеніе того разсужденія, при помощи котораго Ремеръ впервые измѣрилъ скорость свѣта.

329. Если періодическое колебаніе какого-либо рода (производящее водяныя волны, волны звука, свѣта и т. д., распространяющіяся съ равномерною скоростью) происходитъ въ нѣкоторомъ центрѣ, то *число* этихъ колеба-

ній, которое достигаетъ въ теченіе даннаго времени до наблюдателя, зависитъ отъ относительной скорости наблюдателя сравнительно съ центромъ. Когда наблюдатель приближается, число колебаній больше, когда же удаляется—меньше, чѣмъ если онъ находится въ покоѣ относительно центра. Мы, однако, не имѣемъ права (безъ доказательства) предположить, что результатъ во всѣхъ этихъ случаяхъ будетъ *тотъ же самый*, какъ если бы наблюдатель и центръ оставались въ относительномъ покоѣ, а періодъ первоначальнаго колебанія былъ укороченъ или удлиненъ. Въ самомъ дѣлѣ, предположимъ, что центръ и наблюдатель находятся въ покоѣ, а самая среда движется отъ одного къ другому. Въ этомъ случаѣ волны были бы удлинены или укорочены, а быстрота ихъ распространенія пропорціонально увеличена или уменьшена, такъ что число достигающихъ въ данное время волнъ осталось бы неизмѣненнымъ.

Но опыты надъ музыкальными (трубными) тонами на поѣздѣ, идущемъ мимо наблюдателя, подтвердили принципію по отношенію къ звуку; онъ былъ до известной степени провѣренъ и для свѣта наблюденнымъ различіемъ въ преломляемости опредѣленныхъ линій солнечнаго спектра, смотря по тому, шелъ ли свѣтъ съ восточнаго или съ западнаго края солнечнаго диска. [Восточная сторона солнца приближается къ намъ, а западная удаляется отъ насъ, вслѣдствіе вращенія солнца, настолько быстро, что въ то время, какъ солнцемъ испускается 150000 свѣтовыхъ волнъ какого либо рода, до насъ достигаетъ около 150001 волнъ этого рода съ восточной стороны солнца и 149999 съ западной. Такимъ образомъ, если получить спектры этихъ двухъ источниковъ рядомъ посредствомъ одной и той

же приемы, то фраунгоферовы линии въ обоихъ не будутъ совпадать. Относительное перемѣщеніе каждой изъ линий въ спектрахъ будетъ такое, какъ если бы одной соответствовала длина волны на $\frac{1}{175000}$ большая, чѣмъ другой. Подобное же согласіе съ теоріей получено при наблюденіи свѣта, отраженнаго отъ Венеры. Это начало было успешно приложено Гэггинсомъ (Huggins) и другимъ для опредѣленія собственнаго движенія звѣздъ въ направленіи луча зрѣнія. Но столько доказано, что излученіе отъ одного тѣла къ другому зависитъ только отъ ихъ относительнаго движенія, а не отъ движенія самаго по отношенію къ тому или другому.

330. Если мы поэтому примемъ начало за точное (такъ какъ оно, по крайней мѣрѣ отчасти, проверено опытомъ) и предположимъ, что внутри нашей оболочки (§ 295) изъ тѣлъ движется по отношенію къ другимъ, то мы не можемъ представить себѣ поддерживающееся равновѣсіе температуръ иначе, какъ допустить, что энергія, соответствующая каждой изъ безчисленнаго множества волнъ, испускаемыхъ чернымъ тѣломъ, одна и та же при какой-либо данной температурѣ. Этого, конечно, нѣтъ на дѣлѣ; слѣдовательно, если наше предположеніе истинно, относительное движеніе излучающихъ тѣлъ въ замкнутомъ помѣщеніи несовмѣстимо съ окончательнымъ равенствомъ ихъ температуръ.

Но разницы температуры обуславливаютъ существованіе полезной энергіи (*Motivity*; см. главу XXI). Отсюда по второму закону (§ 82) выходило бы, что энергія относительнаго движенія излучающихъ тѣлъ въ замкнутомъ помѣщеніи должна постепенно уменьшаться, и это должно сопровождаться повышеніемъ температуры содержимаго. Срав. приблизительно аналогичный

случай (§ 70) дѣйствія приливовъ на энергію вращательнаго движенія земли.

[Къ тому же выводу приводятъ и другія соображенія. Такъ, если эфиръ представляетъ сопротивленіе движенію обыкновенной матеріи, то ясно, что по крайней мѣрѣ часть движенія должна передаваться эфиру. Эта энергія можетъ быть отдана (какъ мы заключаемъ изъ прекрасной теоріи Максвелля) въ различныхъ электрическихъ формахъ или вполне въ формѣ поперечныхъ колебаній, или лучей (которые въ теоріи Максвелля представляютъ особенный случай магнитныхъ и электрическихъ возмущеній). Но мы совершенно вышли бы за предѣлы учебной книги, если бы захотѣли дольше остановиться на этомъ въ высшей степени интересномъ предметѣ].

331. Количество энергіи, излучаемое солнцемъ, есть для насъ вопросъ поистинѣ жизненнаго значенія. Его можно было бы опредѣлить весьма легко и со значительною точностью, еслибъ не было отраженія, поглощенія и разсѣянія лучей различными составными частями атмосферы солнца и земли. Нельзя думать, чтобы мы скоро оказались въ состояніи оцѣнить даже приблизительно дѣйствіе солнечной атмосферы; но для нашей настоящей цѣли это и не имѣетъ особеннаго значенія. Намъ нужно знать, сколько *лучистой энергіи достигаетъ земли въ данное время.*

Пудье былъ первый, сдѣлавшій успѣшную попытку отвѣтить на этотъ вопросъ; и его результаты не были значительно измѣнены дальнѣйшими изслѣдованіями. Остроумный и простой приборъ, изобрѣтенный имъ для этой цѣли, называется *пирелиометромъ.*

332. Онъ состоитъ въ существенныхъ чертахъ изъ низкаго, но широкаго цилиндрическаго сосуда, сдѣланнаго изъ хорошо отполированнаго металла; одна сторона сосуда покрыта сажей. Сосудъ наполненъ водою или ртутью, и въ жидкость погруженъ резервуаръ тер-

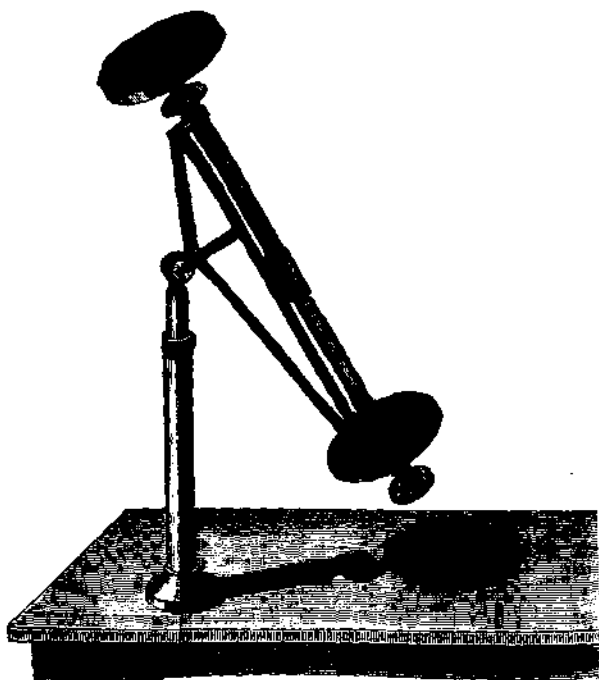


Рис. 48.

мометра, котораго стержень выдается вдоль оси цилиндра. На другомъ концѣ термометра приделанъ металлическій кругъ, котораго діаметръ равенъ діаметру цилиндра. Когда инструментъ установленъ такъ, что тѣни цилиндра и круга совпадаютъ, тогда цилиндръ,

конечно, будетъ повернуть прямо къ солнцу. Теплоемкость цилиндра и его содержаго, также какъ площадь зачерченной стороны должны быть тщательно измѣрены.

Положимъ, что инструментъ, находясь при температурѣ воздуха, затѣненъ отъ солнца и повернуть по направленію къ небу. Термометръ покажетъ чрезъ пять минутъ опредѣленное паденіе температуры; пусть оно будетъ t_0 .

Теперь повернемъ инструментъ на пять минутъ къ солнцу. Термометръ повысится на t градусовъ. Повернемъ инструментъ опять къ небу, затѣнивъ отъ солнца, какъ прежде, и снова замѣтимъ паденіе термометра въ теченіе пяти минутъ; пусть оно будетъ t_1 .

Въ то время, какъ приборъ былъ выставленъ на солнце, его температура повышалась вслѣдствіе солнечнаго излученія и понижалась вслѣдствіе его собственнаго. Мы примемъ приблизительно величину охлажденія равною

$$\frac{t_0 + t_1}{2}$$

т. е. возьмемъ среднее изъ двухъ охлажденій, до и послѣ выставки на солнце, за величину охлажденія въ теченіе выставки.

Слѣдовательно, полное повышение температуры въ теченіе пяти минутъ было бы

$$t + \frac{t_0 + t_1}{2}.$$

Отсюда съ помощью данныхъ для прибора (названныхъ выше) мы тотчасъ находимъ число единицъ тепло-

ты, получаемое отъ солнца единицею площади въ одну минуту.

333. Изъ большого числа опытовъ съ этимъ приборомъ Пулье заключилъ, что быстрота повышенія температуры, обусловливаемая прямыми солнечными лучами въ теченіе данного времени въ разные часы дня, можетъ быть весьма близко представлена выраженіемъ вида

$$A a^{\tau},$$

въ которомъ A и a —постоянныя, а τ представляетъ длину пути солнечныхъ лучей чрезъ атмосферу въ зависимости отъ высоты солнца.

A оказалось почти одинаковымъ для всѣхъ дней, въ которые производились наблюденія; a (которое, конечно, менѣе единицы) измѣнялось замѣтнымъ образомъ изъ дня въ день.

Пулье считалъ эти факты дающими право предположить, что формула была бы примѣнима и при отсутствіи атмосферы; въ такомъ случаѣ мы имѣли бы $\tau=0$, и выраженіе для быстроты повышенія температуры было бы просто A .

Такимъ образомъ Пулье вычислилъ, что количество теплоты, которое прямо падало бы въ минуту на квадратный сантиметръ земной поверхности, если бы не было атмосферы, повысило бы температуру 1,76 граммовъ воды на 1° C. Въ единицахъ, которыя мы употребляли до сихъ поръ, это составило бы около 3,6 единицъ теплоты въ минуту на каждый квадратный футъ поверхности. Отсюда легко вычислить, что все количество теплоты, получаемое землею въ теченіе года, будучи равномерно распределено по земной поверхности, было бы въ со-

стояніи расплавить ледяную кору около 95 футовъ толщиною.

334. Изъ средняго значенія, полученнаго для a въ формулѣ, Пулье заключилъ, что при отвѣсномъ направленіи солнечныхъ лучей и ясномъ небѣ 18—25%, солнечнаго тепла поглощается прежде достиженія земной поверхности, и что (принимая въ расчетъ косвенно падающіе лучи) половина всей солнечной теплоты, падающей на освѣщенную половину земного шара, поглощается атмосферою. Опыты Форбса на Фаульгорнтъ показали, что въ самый ясный день нижніе 6000 футовъ атмосферы поглощаютъ одну пятую лучистой энергіи, входящей отъ солнца ¹⁾.

335. Земля, рассматриваемая съ солнца, представляется дискомъ, занимающимъ лишь около $\frac{1}{2.300.000.000}$ поверхности небесной сферы. Отсюда мы можемъ вычислить количество теплоты (предполагая его равномернымъ), которое испускается каждымъ квадратнымъ футомъ солнечной поверхности въ теченіе даннаго времени. В. Томсонъ, пользуясь данными Гершеля (вмѣстѣ съ данными Пулье), нашелъ, что быстрота солнечнаго излученія составляетъ около 7000 лошадиныхъ силъ на каждый квадратный футъ, т. е. приблизительно въ 30 разъ больше, чѣмъ отъ такой же поверхности толпки نارово-

¹⁾ Ланглей показалъ, что формула, которую употребляли Пулье и многіе другіе для вычисленія результатовъ изъ своихъ наблюденій, должна вести къ совершенно ложнымъ результатамъ; онъ полагаетъ, что наша атмосфера поглощаетъ около 40% всего количества падающихъ на нее отвѣсно солнечныхъ лучей.

за. Все же количество теплоты, испускаемое солнцемъ въ теченіе года, составляетъ около 6×10^{30} единицъ С.

Однако, всѣ эти опредѣленія, хотя *порядокъ* ихъ величины почти навѣрное отвѣчаетъ дѣйствительности, должно разсматривать только какъ приближенія.

336. Большинство опытныхъ опредѣленій абсолютной быстроты тепловой потери было сдѣлано въ воздухѣ, такъ что въ явленія принимали участіе какъ испусканіе, такъ и переносъ теплоты.

Здѣсь Дюлонъ и Пти опять дали намъ эмпирическій законъ. Они нашли, что явленіе переноса совершенно не зависитъ отъ излученія, и что оно одинаково при одной и той же температурѣ для даннаго тѣла, будетъ-ли его поверхность отполирована или зачернена. Оно зависитъ, конечно, отъ природы окружающаго газа, отъ его давленія (p), также какъ и отъ избытка температуры тѣла надъ температурою газообразной среды. Эта часть тепловой потери, по Дюлону и Пти, можетъ быть представлена формулой

$$Ap^{\beta} (t - t_0)^{1,233}$$

Здѣсь A есть особая постоянная; β измѣняется отъ одного газа къ другому, составляя около 0,45 для воздуха.

Эти опыты были сдѣланы съ аппаратомъ въ родѣ описаннаго выше въ § 319; онъ по желанію могъ быть наполняемъ тѣмъ или другимъ газомъ при требуемомъ давленіи. Однако, Провостэ и Дезенъ показали, что законъ, къ которому привели эти опыты, грубо приближенъ; особенно же въ случаѣ низкихъ давленій, если сосудъ малъ.

337. Опредѣленія абсолютной величины потери излученіемъ и переносомъ вмѣстѣ—немногочисленны. Приводимъ слѣдующіе результаты Николя (Nicol).

Потеря теплоты, въ тепловыхъ единицахъ, на квадр. футъ въ минуту:

Блестящая мѣдь	1,09	0,51	0,42
Зачерненная >	2,03	1,46	1,35

Нагрѣтое тѣло имѣло температуру на 50°C выше, чѣмъ оболочка, которая была при 8°C ; давленіе же содержавагося воздуха, соотвѣтственно тремъ столбцамъ таблицы, было около 30, 4 и 0,4 дюймовъ ртути.

По опытамъ Макферлена, числа перваго столбца должны быть соотвѣтственно 1,38 и 2,01. Но въ этомъ случаѣ температура оболочки была 14°C , и воздухъ былъ насыщенъ водяными парами.

Согласіе весьма удовлетворительно, такъ какъ нельзя сомнѣваться, что разницы въ степени полировки блестящей поверхности и количествѣ и качествѣ матеріала, служившаго для ея зачернѣнія, могли бы произвести гораздо большія отклоненія.

338. Опыты съ короткими брусками, какъ въ Форбсовомъ методѣ опредѣленія теплопроводимости (§ 244), даютъ намъ цѣнныя указанія этого рода въ гораздо болѣе широкихъ предѣлахъ температуры, хотя бруски устанавливаются прямо въ комнату, а не въ зачерненной изнутри оболочкѣ; но условія должны быть различны для вертикальныхъ и горизонтальныхъ сторонъ бруска. Этимъ путемъ получены слѣдующія приблизительныя числа, выраженные въ тѣхъ же единицахъ, какъ выше; температура воздуха 17°C :

Избытокъ температуры .	50°С.	100°	150°	200°	250°
Полированное желѣзо . .	1,13	2,76	4,76	7,33	10,55
Закопченное желѣзо . . .	1,40	3,64	6,75	11,25	17,21

При расчетѣ результатовъ опыта принималось (какъ въ § 247), что удѣльная теплота желѣза возрастаетъ приблизительно на 1 процентъ съ каждымъ 7°С. Мы замѣчаемъ интересный фактъ, что отношенія этихъ чиселъ, для каждаго изъ членовъ арифметической прогрессіи температуръ, образуютъ почти точную геометрическую прогрессию.

Хотя и не очень согласныя между собою, эти разнообразныя опредѣленія даютъ намъ, по крайней мѣрѣ, общее понятіе о величинѣ потери теплоты охлаждающимся тѣломъ, выраженной въ тепловыхъ единицахъ.

339. *Содержаніе §§ 318—338.* Излученіе отъ одного и того же тѣла при различныхъ температурахъ. Законъ Дюлона и Пти. Измѣренія поглощенія, сдѣланныя Меллони. Пульс о солнечномъ излученіи. Пиргелиометръ. Потеря теплоты излученіемъ и переносомъ одновременно.

ГЛАВА XIX.

Единицы и измѣренія.

340. Никто не затруднится понять, что полкроны будетъ тридцать пейсовъ или что ферлонгъ равенъ 220 ярдамъ, или 660 футамъ. Пріемъ совершенно сходный съ тѣмъ, какой мы употребляемъ въ подобныхъ повседневныхъ переводахъ, позволяетъ намъ выразить данную сумму англійской монеты въ соотвѣтственномъ числѣ франковъ или данное число ярдовъ—въ соотвѣтственномъ числѣ сантиметровъ. Выше (§ 132), говоря о томъ, какъ переводятся показанія термометровъ съ одной шкалы на другую, мы сказали все необходимое относительно сущности подобныхъ простыхъ превращеній, въ которыхъ мы переходимъ отъ кратнаго одной единицы къ соотвѣствующему кратному другой одного съ нею рода. Когда надо превратить двѣ или болѣе единицъ одновременно, дѣйствіе (численно) немного сложнѣе, но начало остается то же самое. Въ самомъ дѣлѣ, мы можемъ непосредственно приложить его, измѣняя за одинъ разъ только одну единицу и пройдя такъ чрезъ всѣ. Напр., скорость 10 футовъ въ

секунду есть 5280 фут. въ 528 секундъ, т. е. миля въ 528 секундъ, или (окончательно) миля въ 8 м. 48 с. Или мы можемъ взять 600 футовъ въ минуту; это составитъ 36000 футовъ, или около 6,82 мили въ часъ. Такія задачи могутъ представить только трудности въ работѣ, но не въ *принципѣ*.

341. Нѣсколько менѣе легкій случай представляется въ слѣдующемъ вопросѣ: напряженность тяжести изображается числомъ 32,2 въ футахъ и секундахъ; какъ она представится въ миляхъ и часахъ? [Мы могли бы пожелать выразить ее въ сантиметрахъ и минутахъ; но это только измѣнило бы необходимые численные множители: принципъ и самое дѣйствіе остались бы неизмѣненными]. Приступая къ рѣшенію такого вопроса, мы прежде всего должны тщательно разобрать, *въ какой зависимости величина находится отъ различныхъ единицъ*? Разъ это сдѣлано — все остальное сводится къ чисто арифметическимъ дѣйствіямъ. «Напряженность тяжести изображается числомъ 32,2 въ футахъ и секундахъ» — это значитъ, что тяжесть производитъ въ падающемъ тѣлѣ въ каждую секунду прибавочную скорость 32,2 футовъ въ секунду. Обратимъ вниманіе на то, что въ этомъ болѣе подробномъ выраженіи *футъ* названъ только одинъ разъ, тогда какъ *секунда* встрѣчается дважды. Небольшое размышленіе показываетъ, что численное выраженіе величины тяжести, поскольку оно зависитъ отъ единицы длины, въ футахъ должно быть въ 5280 разъ больше, чѣмъ въ миляхъ. Далѣе, дѣйствіе тяжести въ теченіе часа должно быть въ 3600 разъ больше, чѣмъ въ одну секунду; а если мы будемъ мѣрить его пространствомъ, пройденнымъ въ часъ, вмѣсто того, чтобы мѣрить пространствомъ, пройденнымъ въ се-

кунду, то результатъ увеличится еще въ 3600 разъ. Въ общемъ, мы должны поэтому данное число 32,2 умножить *дважды* на 3600 и раздѣлить произведеніе на 5280. Такимъ образомъ для тяжести въ миляхъ и часахъ мы получаемъ

$$32,2 \frac{(3600)^2}{5280} = 79036 \text{ приблиз.}$$

Это значитъ, что тѣло, падающее подъ вліяніемъ (постоянной) тяжести, приобретаетъ въ каждый часъ прибавочную скорость 79036 миль въ часъ.

342. Взглянемъ на эти примѣры съ другой точки зрѣнія. Скорость тѣмъ больше, чѣмъ больше пройденное пространство, и тѣмъ меньше, чѣмъ больше употребленное на то время. Следовательно, скорость стоитъ въ прямомъ отношеніи къ длинѣ пройденнаго пути и въ обратномъ отношеніи ко времени; или, какъ принято писать,

$$[V] = \left[\frac{L}{T} \right].$$

Ускореніе тѣмъ больше, чѣмъ больше произведенная прибавочная скорость, и тѣмъ меньше, чѣмъ больше употребленное на то время; такимъ образомъ

$$[A] = \left[\frac{V}{T} \right] = \left[\frac{L}{T^2} \right].$$

Если единица увеличивается въ какомъ-либо отношеніи, то опредѣленная величина, выраженная этою единицею, численно уменьшается въ томъ же отношеніи. [Такъ, если мы увеличимъ единицу въ 20 разъ, напр. переходя отъ шиллинга къ фунту, то найдемъ $480s. = \frac{1}{20} 480l. = 24l.$] Всякая опредѣленная величина однородна по отношенію къ каждой изъ основныхъ единицъ, вхо-

дящихъ въ ея составъ. Такъ, для пространства, пройденнаго при постоянномъ ускореніи въ направленіи линіи движенія, мы имѣемъ выраженіе

$$s = a + bt + \frac{1}{2} ct^2.$$

Здѣсь s и a имѣютъ измѣреніе $[L]$

b , скорость, есть $\left[\frac{L}{T} \right]$

a и c , ускореніе, $\left[\frac{L}{T^2} \right]$.

Такимъ образомъ каждый членъ выраженія s имѣетъ, какъ самое s , измѣреніе $[L]$.

Отсюда видно, что для опредѣленія численнаго множителя, служащаго для перехода отъ какой либо одной системы единицъ къ другой, требуется только *найти измѣреніе величины въ зависимости ея отъ тѣхъ основныхъ величинъ*, къ которымъ всегда можно привести каждую другую измѣримую величину. Теорія измѣреній, какъ замѣчено выше, принадлежитъ Фурье.

343. Основные величины суть: длина $[L]$, масса $[M]$ и время $[T]$; ближайшее же опредѣленіе размѣровъ единицъ есть дѣло чисто условное.

Такъ мы можемъ принять, какъ дѣлали до сихъ поръ, систему футъ-фунтъ-минута; или можемъ взять систему миля-тонна-день; или—что повидимому болѣе и болѣе входить въ научное употребленіе—систему сантиметръ-граммъ-секунда (C. G. S.).

Учащійся долженъ помнить, что выборъ единицъ отнюдь не есть ничто имѣющее научную важность, а есть главнымъ образомъ дѣло удобства; что собственно желательно имѣть въ наукѣ, это—*общую* систему, еслибъ

даже она была непригодна для цѣлей практической жизни. (См. § 56).

344. Но вопросъ объ измѣреніяхъ имѣетъ величайшее научное значеніе и слишкомъ легко оставляется въ сторонѣ при пререканіяхъ относительно единицъ. Было бы, можетъ быть, слишкомъ много сказать, что дурно выбранная система единицъ, если она заставляетъ думать, предпочтительнѣе хорошо выбранной системы, способной вести къ ошибкамъ вслѣдствіе слѣплого, механическаго къ ней довѣрія. Но въ этомъ утвержденіи есть и доля правды. Азбука и словосочиненіе совершенно не зависятъ отъ того или другого почерка; но прежде, чѣмъ писать правильно, даже обладая самымъ лучшимъ почеркомъ, нужно знать азбуку и грамматику. Къ сожалѣнію, защищаемая нынѣ система C. G. S., подъ благовиднымъ названіемъ системы *абсолютныхъ единицъ*, очень способна ввести въ заблужденіе начинающаго, оставляя въ немъ такое впечатлѣніе, какъ будто выборъ этихъ единицъ имѣетъ нѣкоторое таинственное отношеніе къ научнымъ истинамъ. Если бы вновь предложенная система единицъ оказалась болѣе удобною для общаго употребленія, чѣмъ та, которую она должна замѣнить, то каждый сталъ бы требовать измѣненія. Нѣтъ сомнѣнія, что наши теперешнія нормальные мѣры явились какъ слѣдствіе ихъ удобства для всѣхъ. Каждый понимаетъ, когда говорится о человѣкѣ пяти футовъ восьми дюймовъ роста и четырехъ пудовъ вѣса. Въ системѣ C. G. S. эта выгода вполнѣ принесена въ жертву другой (замѣтной особенно въ электрическихъ измѣреніяхъ). Средній ростъ мужчины и обыкновенная скорость его ходьбы выражаются здѣсь приблизительно 170 соответствующими единицами; его масса

составляет около 70000 единиц; а его вѣсъ, также выраженный въ соответствующихъ единицахъ (*динахъ*), достигаетъ огромнаго числа около 70,000,000. Лошадиная сила составляетъ около 7,500,000,000 *эрговъ* въ секунду. Такимъ образомъ система пригодна лишь для чисто научныхъ цѣлей.

[Гораздо настоятельнѣе потребность въ общенаучномъ языкѣ. Если бы *оригинальныя* сочиненія и теперь, какъ прежде, писались по-латыни—насколько быстрѣе былъ бы тогда прогрессъ науки? Конечно, большая часть новыхъ и цѣнныхъ научныхъ работъ нашего времени печатается по-англійски, по-французски или по-нѣмецки или, по крайней мѣрѣ, дается въ извлеченіи на нѣкоторыхъ изъ этихъ языковъ. Но многое остается на чешскомъ, датскомъ, голландскомъ, итальянскомъ, русскомъ, шведскомъ и др. языкахъ и такимъ образомъ, можно сказать, теряется для большинства тѣхъ, для кого оно могло имѣть величайшее значеніе. Мудрый консерватизмъ ботаниковъ, хотя и осмѣянный «передовою» наукой, сохранилъ имъ эту неоцѣненную систему, какъ своего рода франмасонство].

345. Слѣдующее сопоставленіе измѣреній очевидно само собою:

$$\text{Объемъ } [v] = [L^3]. \quad \text{Скорость } [V] = \left[\frac{L}{T} \right].$$

$$\text{Плотность } [d] = \left[\frac{M}{L^3} \right]. \quad \text{Количестводвиженія } [\mu] = \left[\frac{ML}{T} \right]$$

$$\text{Сила } [F] = \left[\frac{M}{T^2} \right] = \left[\frac{ML}{T^2} \right]$$

Давленіе $[p]$ = сила на единицу поверхности =

$$\left[\frac{F}{L^2} \right] = \left[\frac{M}{LT^2} \right].$$

$$\text{Энергія } [E] = [FL] = [MV^2] = [pv] = \left[\frac{ML^2}{T^2} \right].$$

$$\text{Рабочая способность (работа въ единицу времени) } [P] \\ = \left[\frac{E}{T} \right] = [FV] = \left[\frac{ML^2}{T^3} \right].$$

346. Переходимъ теперь къ сложнымъ измѣреніямъ, связаннымъ собственно съ нашимъ предметомъ. Здѣсь нужна новая основная единица, единица температуры $[\Theta]$. Она опять произвольна; но для нижеслѣдующихъ примѣровъ мы возьмемъ за таковую 1°C абсолютной шкалы (§ 96).

Нѣсколько примѣровъ, вполне разобранныхъ и объясненныхъ, покажутъ читателю, въ чемъ суть дѣла; послѣ этого онъ самъ легко разберетъ другіе случаи.

Коэффициентъ расширенія (§§ 100, 113) есть отношеніе процентнаго измѣненія длины или объема къ соответствующему измѣненію температуры. Такъ какъ процентное измѣненіе есть отвлеченное число, то измѣреніе расширяемости будетъ просто

$$[\Theta^{-1}].$$

Теплоту $[H]$, какъ мы видѣли, можно измѣрять различнымъ образомъ. Если она выражена въ динамическихъ единицахъ, то ея измѣренія тѣ же, какъ выше для $[E]$.

Если она измѣрена тепловыми единицами, т. е. повышеніемъ температуры, которое она производитъ въ массѣ нѣкотораго нормальнаго вещества (какъ напр. воды, § 55), то ея количество пропорціонально массѣ и повышенію температуры; слѣдовательно, измѣреніе ея будетъ

$$[M\Theta].$$

Если же теплота выражена въ термометрическихъ единицахъ (§ 246), то ея измѣреніе будетъ

$$[L^3\Theta].$$

Далѣе, изъ опредѣленія теплопроводимости (§ 237) мы видимъ, что

проводимость $\times$ паденіе температуры $\times$ поверхность $\times$ время

есть мѣра протекшей теплоты. Такимъ образомъ, если k обозначаетъ теплопроводимость,

$$[k] \left[\frac{\Theta}{L} \right] [L^2] [T] = [H],$$

или

$$\begin{aligned} [] &= \left[\frac{H}{\Theta L T} \right] \\ &= \left[\frac{ML}{\Theta T^3} \right] \text{ въ энергіи,} \\ &= \left[\frac{M}{LT} \right] \text{ въ тепловыхъ единицахъ,} \\ &= \left[\frac{L^2}{T} \right] \text{ въ термометрич. единицахъ.} \end{aligned}$$

Подобнымъ же образомъ находимъ, что

$$\begin{aligned} \text{Быстрота испусканія} &= \left[\frac{H}{L^2 T} \right] \\ &= \left[\frac{M}{T^3} \right] = \left[\frac{P}{L^2} \right], \text{ какъ энергія,} \\ &= \left[\frac{M\Theta}{L^2 T} \right] \text{ въ тепловыхъ единицахъ.} \\ &= \left[\frac{L\Theta}{T} \right] \text{ въ термометрич. единицахъ.} \end{aligned}$$

347. Такимъ образомъ, чтобы результаты § 246, выраженные въ тепловыхъ единицахъ футъ-фунтъ-минута, превратить въ соотвѣтствующія значенія, выраженные въ единицахъ С. G. S., мы имѣемъ, какъ выше,

$$[k] = \left[\frac{M}{LT} \right].$$

Но

Фунтъ = 453,6 грам., приблиз.

Футъ = 30,48 сантиметровъ, приблиз.

Минута = 60 секундъ.

Слѣдовательно, требуемый множитель есть

$$\frac{453,6}{60 \times 30,48} = \frac{1}{4,03} \text{ приблиз.}$$

Итакъ, въ С. G. S. единицахъ тепловая проводимость желѣза есть около 0,2, а мѣди отъ 1 до 0,5.

Для быстроты испусканія, § 337, мы имѣемъ переводный множитель

$$\left[\frac{M\Theta}{L^2T} \right]$$

Здѣсь $[\Theta]$ въ обѣихъ системахъ есть градусъ стоградусной шкалы, такъ что требуемый множитель будетъ

$$\frac{453,6}{60 \times (30,48)^2} = \frac{1}{123} \text{ приблиз.}$$

Подобнымъ образомъ и столь же легко можетъ быть найденъ переводный множитель съ одной системы на другую для прочихъ экспериментальныхъ данныхъ, относящихся къ нашему предмету ¹⁾.

¹⁾ Для болѣе подробнаго знакомства съ предметомъ, составляющимъ содержаніе этой главы, см. J. D. Everett «Единицы и физическія постоянныя», перев. съ 2-го англійскаго изданія Вербицкаго и Жеребятъева. Сиб. 1888. Зам. р. перев.

348. *Содержаніе* §§ 340—347. Переиѣна единицъ есть чисто арифметическое дѣйствіе. Трудность заключается собственно въ томъ, чтобы разобрать зависимость данной величины отъ различныхъ единицъ. Измѣренія объема, давленія, энергіи и т. д. Измѣренія теплоты, проводимости, быстроты испусканія и т. д. Примеры перевода на С. G. S. единицы.

ГЛАВА XX.

Индикаторная діаграмма Уатта.

349. Кромѣ многихъ важныхъ усовершенствованій, сдѣланныхъ Уаттомъ въ паровой машинѣ [нѣкоторыя изъ нихъ, какъ отдѣльный холодильникъ или машины съ расширеніемъ пара, являются приложеніемъ физическихъ знаній, другія, какъ его параллелограмъ, обязаны механическому дарованію], имъ же придумана такъ-называемая *индикаторная діаграмма*, которая имѣетъ величайшее значеніе для элементарнаго изложенія основныхъ началъ термодинамики. Уаттъ назначалъ ее для опредѣленія работы паровой машины; для этой и подобныхъ цѣлей она употребляется и до сихъ поръ. Но Клапейронъ и позднѣе Ранкинъ настолько разработали діаграмму, что помощью ея мы можемъ не только изображать работу паровой машины, но и различныя ступени процесса; термическія свойства самого работающаго вещества и ихъ отношенія къ законамъ термодинамики. Зародыши метода можно, конечно, найти въ различныхъ частяхъ Ньютоновыхъ *Principia*, гдѣ Ньютону приходилось графически изображать то, что мы нынѣ называемъ интеграломъ.

350. Въ нашъ планъ не входитъ описаніе практическихъ подробностей устройства самого *индикатора* (указателя работы) — въ употребленіи находятся многія остроумныя формы его. Эти подробности, также какъ и частности построенія паровыхъ машинъ и т. д., относятся скорѣе къ инженерному дѣлу, чѣмъ къ физикѣ собственно, и гораздо успѣшнѣе изучаются внимательнымъ наблюденіемъ прибора въ дѣйствіи, нежели чтеніемъ хотя бы самыхъ подробныхъ описаній или разсматриваніемъ самыхъ точныхъ чертежей. Намъ нужно только объяснить суть дѣла, которая просто состоитъ въ слѣдующемъ. Къ стержню поршня машины прикрѣпленъ карандашъ такъ, что онъ движется вслѣдъ за поршнемъ впередъ и обратно и такимъ образомъ своимъ положеніемъ въ каждый моментъ указываетъ *объемъ* содержимаго въ цилиндрѣ. Карандашъ имѣетъ еще другое движеніе, въ направленіи перпендикулярномъ первому, такое именно, что перемѣщеніе его въ этомъ новомъ направленіи въ каждый моментъ пропорціонально *давленію* содержимаго въ цилиндрѣ. Такимъ образомъ конецъ карандаша на листѣ бумаги, укрѣпленномъ неподвижно, чертитъ линію, которой каждая точка даетъ намъ два одновременныхъ значенія объема и давленія работающаго вещества. [Въ нѣкоторыхъ формахъ инструмента карандашъ имѣетъ одно изъ двухъ движеній, а бумага другое. Кромѣ того, приспособленіе обыкновенно устроятъ такъ, чтобы объемы и давленія изображались въ шкалѣ, надлежащимъ образомъ уменьшенной. Но окончательный результатъ одинъ и тотъ же: способъ его достиженія есть лишь дѣло остроумія и удобства].

351. Фигура $PP'Q'Q$ (см. рис. 49) представляетъ одну изъ такихъ діаграммъ. Различныя значенія OM

изображаютъ объемъ работающаго вещества, соответственные значенія MP —его давленіе.

По Уатту, діаграмма даетъ работу, произведенную машиною во время одного удара поршня. Въ самомъ

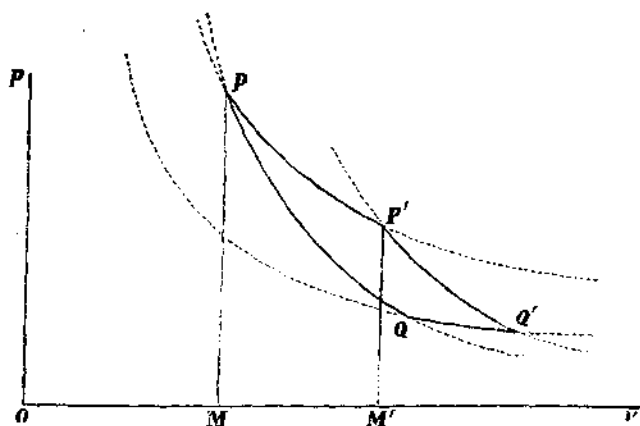


Рис. 49.

дѣль, если S есть площадь поршня, а p давленіе (на единицу поверхности), то все производимое давленіе есть pS . Если поршень подъ дѣйствіемъ этой силы перемѣщается на пространство h , то произведенная работа равна (§ 13)

$$pS \cdot h \text{ или } p \cdot Sh.$$

Но Sh есть приращеніе объема работающаго вещества. Поэтому при постоянномъ давленіи работа выражается произведеніемъ давленія на приращеніе объема. На чертежѣ это соответствовало бы тому случаю, когда PP' была бы прямая параллельная Ov ; тогда работа, произведенная при расширеніи отъ OM до OM' , представилась бы площадью прямоугольника $MP P' M'$.

Если давленіе (какъ на рисункѣ) непостоянно, то мы должны разбить расширение на отдѣльныя ступени. соотвѣтствующія каждая безконечно малому приращенію объема. Мы получаемъ такимъ образомъ (какъ въ § 190) нѣкоторое число узкихъ прямоугольниковъ, сумма площадей которыхъ въ предѣлѣ равна криволинейной площади $MPP'M'$. Подобныя же построения должно сдѣлать для расширения отъ P' до Q' и для сжатій отъ Q' до Q и отъ Q до P .

Если объемъ уменьшается вмѣсто того, чтобы увеличиваться, то слѣдуетъ считать, что работа, измѣренная какъ только что указано, *расходуется* на работающее вещество и, слѣдовательно, принимать работу отрицательною.

Замѣтивъ это, мы прямо видимъ, что если замкнутая фигура $PP'Q'Q$ будетъ діаграммою машины, то площадь этой фигуры представить работу, произведенную въ теченіе полного кругового процесса. Ибо работа положительна отъ P до P' и отъ P' до Q' , но отрицательна отъ Q' до Q и отъ Q до P .

Вся работа, произведенная въ теченіе такого кругового процесса, слѣдовательно, положительна, если карандашъ движется вокругъ діаграммы по направленію стрѣлки часовъ, и отрицательна въ противоположномъ случаѣ.

Если діаграмма пересѣкается сама съ собою, то нѣкоторыя части ея площади будутъ отрицательны, другія положительны; но сказанное выше прилагается въ отдѣльности къ каждой изъ ея частей.

352. Если бы діаграмма доставляла намъ только это, то ея значеніе (какъ оно ни велико) было бы главнымъ образомъ практическое, для каковой цѣли она первоначаль-

чально и предназначена была Уаттомъ. Но мы должны теперь рассмотреть ее съ болѣе высокой точки зрѣнія.

Для цѣлей нашего разсмотрѣнія предположимъ, что имѣется определенное количество, напр. единица массы работающаго вещества, и что оно не выходитъ изъ цилиндра; далѣе, что оно по всей массѣ (въ каждый моментъ) имѣетъ одну и ту же температуру и одно и то же гидростатическое давленіе. Последнее условіе собственно ограничиваетъ наше разсмотрѣніе жидкостями, будутъ ли то капельныя жидкости, пары или газы, или же ихъ смѣси, какъ напр. капельная жидкость въ присутствіи ея насыщенныхъ паровъ.

Въ последнемъ случаѣ, въ промежуткѣ между тѣми предѣлами объема, когда все вещество жидко и когда оно все парообразно, мы имѣемъ лишь нѣкоторое определенное соотношеніе между температурою и давленіемъ. Объемъ, если онъ данъ, позволяетъ намъ въ этомъ случаѣ узнать далѣе, *какое количество* вещества находится въ жидкомъ состояніи.

Въ первыхъ же трехъ случаяхъ, какъ мы видѣли (§§ 121, 124), существуетъ определенное соотношеніе между объемомъ, давленіемъ и температурою, соотношеніе, форма котораго зависитъ отъ того или другого вещества, но которое достаточно для опредѣленія какой-либо одной изъ трехъ названныхъ величинъ по двумъ остальнымъ. Мы предполагаемъ, что это соотношеніе путемъ опыта установлено для того вещества, свойства котораго именно входятъ въ наше разсмотрѣніе.

353. Но это еще не все. Физическое состояніе вещества вполнѣ опредѣлено, когда изъ названныхъ величинъ даны любыя двѣ. [Читатель не долженъ забывать, что мы имѣемъ дѣло съ определеннымъ количе-

ствомъ вещества]. Такъ, въ частномъ случаѣ, если даны объемъ и давленіе, можно вычислить температуру. Каждая точка P диаграммы отвѣчаетъ такимъ образомъ одной температурѣ; и если мы соединимъ линіями всѣ точки, соотвѣтствующія одной опредѣленной температурѣ, то мы покроемъ диаграмму рядомъ *изотермъ*, или *линій равной температуры*. Части ихъ PP' и QQ' приблизительно указаны на нашей диаграммѣ (рис. 49).

Каждая изъ этихъ линій даетъ графическое изображеніе зависимости между давленіемъ и объемомъ вещества, пока его температура остается неизмѣнной. Это отвѣчаетъ *второй и четвертой* операціямъ въ циклѣ Карно (§ 86). *Первая и третья* операціи кругового процесса основываются на свойствахъ работающаго вещества, когда оно окружено непроводящими тѣлами и, слѣдовательно, не можетъ прямо получать или отдавать теплоту. Представимъ себѣ, что въ диаграммѣ отъ любой точки (соотвѣтствующей, какъ мы видѣли, опредѣленному состоянію тѣла) проведена линія, которая изображаетъ зависимость между давленіемъ и объемомъ при этомъ новомъ ограниченіи. Диаграмма можетъ быть такимъ образомъ покрыта новымъ рядомъ кривыхъ, которыя Ранкинъ назвалъ *адиабатическими линіями*. Въ данной выше приближительной диаграммѣ PQ и $P'Q'$ представляютъ части двухъ такихъ линій. Другія опредѣленныя условія вообще привели бы къ своей собственной особой группѣ линій; но двѣ группы, которыя мы называли, далеко важнѣе всѣхъ другихъ для нашей настоящей цѣли. Мы должны рассмотреть ихъ съ нѣкоторою тщательностью.

354. До сихъ поръ мы могли считать, что температура измѣряется по любой шкалѣ, какъ бы послѣдняя

ни была опредѣлена. Но однимъ изъ важнѣйшихъ результатовъ настоящей главы будетъ *абсолютное* измѣреніе температуры, на которое В. Томсонъ былъ навѣденъ замѣчательнымъ изслѣдованіемъ Карно. Разъ мы дошли до такого способа измѣренія, всякій другой долженъ уступить ему мѣсто.

355. Между прочимъ, сдѣлаемъ общее замѣчаніе, что линіи каждой группы на плоской діаграммѣ можно разсматривать какъ послѣдовательныя параллельныя *сѣченія* нѣкоторой поверхности, изображающей общее соотношеніе между объемомъ, давленіемъ и тою величиною, которая характеризуетъ данный классъ линій. Такъ, линіи равной температуры суть сѣченія—перпендикулярныя оси температуръ—той поверхности, которая даетъ зависимость между объемомъ, давленіемъ и температурою. Сѣченія той же поверхности, перпендикулярныя оси объемовъ, дали бы рядъ кривыхъ равнаго объема въ координатахъ давленія и температуры. Самыя поверхности можно разсматривать какъ части нѣкоторой гористой страны; параллельныя же сѣченія ихъ будутъ соответствовать контурнымъ линіямъ. И всѣ свойства контурныхъ линій находятъ здѣсь новыя и интересныя примѣненія.

Можно придумать любое число такихъ поверхностей и соответственныхъ кривыхъ сѣченій; мы упоминаемъ только о тѣхъ, которыя имѣютъ главное значеніе.

356. Можно представить себѣ, что изотермы, или линіи равной температуры, начерчены самымъ индикаторомъ, причемъ содержимое цилиндра берется при температурахъ послѣдовательно болѣе и болѣе высокихъ, и при каждой температурѣ поршню въ цилиндрѣ даютъ ходъ впередъ и обратно. Для даннаго случая мы мо-

жемъ предположить, что температура возрастаетъ каждый разъ на 1° С или же на опредѣленное кратное или опредѣленную долю такого градуса. Но одинъ изъ важнѣйшихъ предметовъ, который мы имѣемъ въ виду, есть абсолютное измѣреніе температуры. Когда оно будетъ установлено, мы будемъ имѣть очевидно подходящее правило для проведенія послѣдовательныхъ изотермъ.

357. Объ изотермахъ совершеннаго газа (§ 126) достаточно сказать нѣсколько словъ. Такъ какъ при каждой температурѣ произведеніе изъ давленія на объемъ постоянно, то линіи PP' , QQ' на рис. 49 будутъ равносторонними гиперболами, и прямыя Ov и Or — ихъ ассимптоты. Всѣ эти кривыя подобны и подобнымъ образомъ расположены; линейные ихъ размѣры относятся, какъ квадратные корни соотвѣтственныхъ абсолютныхъ температуръ. Такимъ образомъ, будучи проведены при послѣдовательно равныхъ промежуткахъ температуры, кривыя тѣмъ болѣе приближаются другъ къ другу, чѣмъ выше температура.

358. Изотермы наиболѣе постоянныхъ газовъ, какъ водородъ, воздухъ и его составныя части и т. д., въ обыкновенныхъ предѣлахъ температуры и давленія не отличаются значительно отъ равностороннихъ гиперболъ. Для давленій меньшихъ, чѣмъ примѣрно 140 атмосферъ, изотермы воздуха лежатъ чуть *ниже* гиперболъ совершеннаго газа.

Что происходитъ при очень малыхъ давленіяхъ — съ достовѣрностью неизвѣстно. На дѣлѣ, если вѣрна кинетическая теорія газовъ, нельзя въ точномъ смыслѣ сказать, чтобы газъ чрезвычайно разрѣженный имѣлъ повсемѣстно одно и то же опредѣленное давленіе. Въ каждый моментъ происходили бы то здѣсь, то тамъ, отдѣль-

ные точки въ очень различныхъ мѣстахъ стѣнокъ сосуда, вмѣсто того совмѣстнаго и непрерывнаго бомбардирования, которое (для нашихъ грубыхъ чувствъ) является равномернымъ и постояннымъ давленіемъ.

При обыкновенныхъ температурахъ и около 140 атмосферъ изотермы воздуха пересѣкаютъ гиперболы, а при высшихъ давленіяхъ показываютъ объемы, которыхъ отношеніе къ объемамъ идеальнаго газа подъ тѣмъ же давленіемъ постоянно возрастаетъ. Онѣ какъ бы имѣютъ асимптоту *параллельную* прямой нулевого объема (*O*р на рис. 49), лежащую отъ нея на конечномъ разстояніи. Этого и можно было, конечно, ожидать, ибо мы не имѣемъ рѣшительно никакихъ основаній думать, чтобы возможно было совершенно лишить объема какую-либо конечную массу матеріи, какъ бы велико ни было производимое на нее давленіе.

359. Изотермы различныхъ газовъ въ предѣлахъ обыкновенныхъ температуръ были въ недавнее время опредѣлены до весьма большихъ давленій и очень тщательно Амагă. Особенное достоинство его приѣма въ томъ, что давленіе прямо измѣрялось столбомъ ртути: высота его иногда превосходила 1000 футовъ. Результаты, полученные Амагă, очень важны; но они стоятъ лишь въ отдаленной связи съ главнымъ предметомъ нашего настоящаго изслѣдованія.

360. Различіе между истиннымъ газомъ и паромъ весьма ясно сказывается на изотермахъ угольнаго ангидрида, полученныхъ Эндрьюсомъ въ названномъ выше классическомъ изслѣдованіи (§ 174). На стр. 371 данъ его чертежъ съ нѣкоторыми легкими измѣненіями, которые онъ указалъ и принялъ въ расчетъ въ своемъ мемуарѣ. Согласно мысли, поданной Максвеллемъ, введена

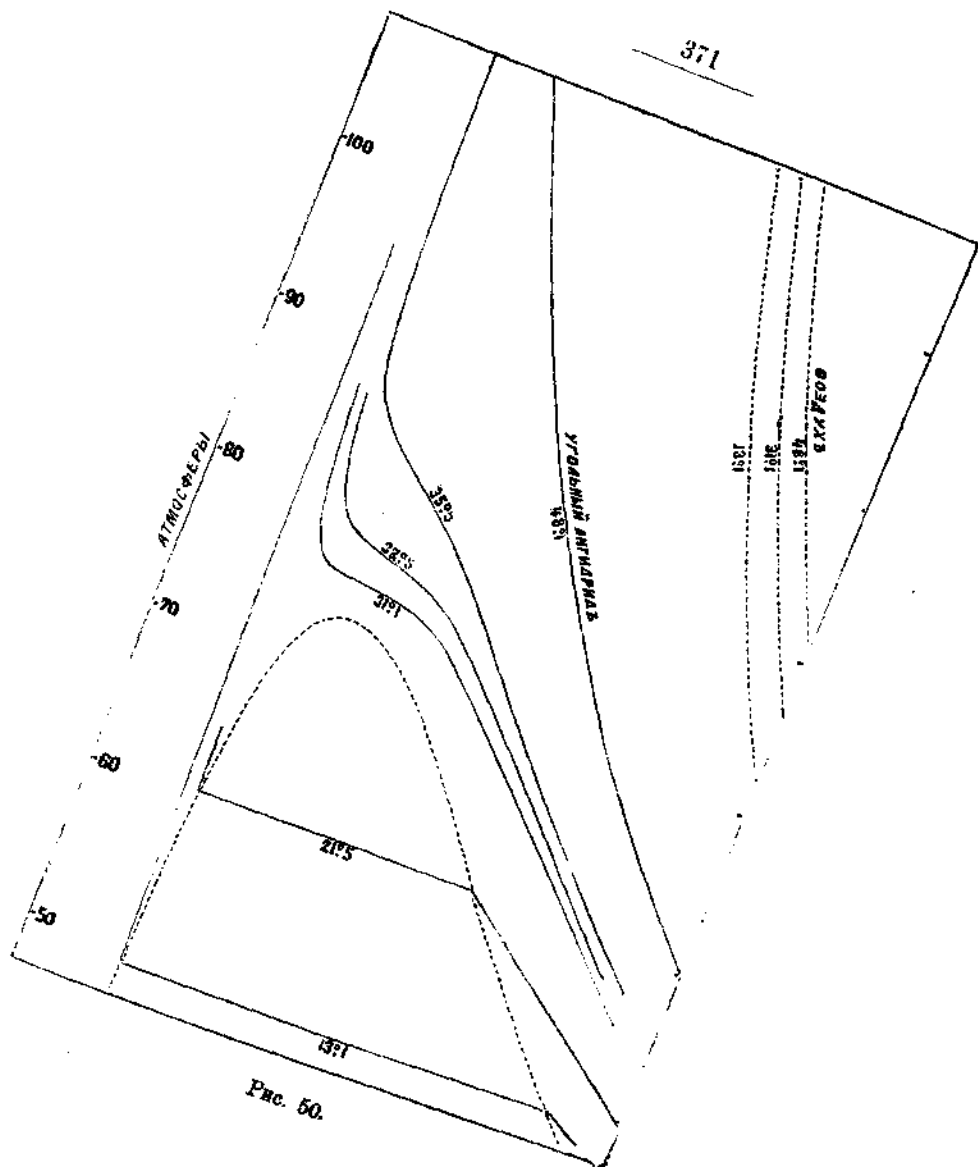
еще новая линия (пунктирная). Часть этой линии до известной степени основана на догадках по недостаточности опытных данных; но, при всемъ ея несовершенствѣ, она даетъ намъ много новыхъ и важныхъ свѣдѣній.

Такъ какъ, надо полагать, читатель будетъ теперь въ состояніи вполне понять непосредственные указанія индикаторной діаграммы, то мы отсылаемъ его опять къ § 175, который онъ пусть внимательно перечитаетъ, руководствуясь прилагаемымъ здѣсь чертежемъ (стр. 371).

Чертежъ содержитъ двѣ группы кривыхъ, представляющихъ изотермы угольного ангидрида и воздуха при температурахъ между $13^{\circ},1$ и $48^{\circ},1$ С.

[Массы обѣихъ количествъ газовъ были неодинаковы, такъ что сравненіе невозможно въ томъ смыслѣ, какъ оно до сихъ поръ предполагалось въ этой главѣ. Воздухъ именно былъ употребляемъ только какъ манометръ, чтобы (по измѣненію его объема) судить о давленіи угольного ангидрида на каждой ступени процесса. Слѣдовательно, изотермы относятся къ той массѣ воздуха, которой объемъ при 1 атмосферѣ и $13^{\circ}, 1$ С былъ равенъ объему угольного ангидрида].

Новая пунктирная линия проведена чрезъ всѣ тѣ пары точекъ каждой изотермы (ниже критической температуры), въ которыхъ угольный ангидридъ или только что начинаетъ превращаться въ жидкость, или только что весь становится жидкимъ. Эта линия, слѣдовательно, охватываетъ ту область, *въ которой паръ можетъ быть въ термическомъ равновѣсіи съ жидкостью*. Взглядъ на рисунокъ показываетъ, что предѣлы объема, соотвѣтствующие этой области, постепенно сближаются по мѣрѣ возвышенія температуры: лѣвая вѣтвь пунктирной кри-



вой изгибается вправо, а правая—влѣво. Такимъ образомъ, по мѣрѣ постепеннаго возвышенія температуры, наименьшій объемъ, при которомъ угольный ангидридъ еще весь парообразенъ, становится меньше, а наибольшій объемъ, при которомъ онъ весь жидокъ, становится больше. Около самой критической температуры (но ниже ея) эти объемы практически одинаковы.

Далѣе, какъ видно изъ рисунка, сжимаемость угольного ангидрида какъ разъ передъ тѣмъ, какъ онъ начинаетъ сжиматься, дѣлается меньше и меньше съ повышеніемъ температуры, а сжимаемость жидкаго (когда именно вся масса только что стала жидкою) дѣлается больше и больше.

Такимъ образомъ, по объему и по сжимаемости при одной температурѣ оба эти состоянія мало-по-малу сближаются, пока наконецъ при критической температурѣ и выше они болѣе неотличимы другъ отъ друга.

Большая расширяемость жидкаго угольного ангидрида, найденная Тилорье (§ 122), очевидна изъ рисунка, также какъ и большая его сжимаемость (открытая Эндрьюсомъ).

Если мы представимъ себѣ на рисункѣ ломаную линію, образованную лѣвою вѣтвью пунктирной кривой и (для высшихъ предѣловъ давленій) критическою изотермою, то очевидно, что для всякаго состоянія, изображаемаго точкою *по лѣвую* сторону отъ этой линіи, весь угольный ангидридъ жидокъ.

Если проведемъ другую ломаную линію, составленную изъ правой вѣтви пунктирной кривой и изъ той же самой части критической изотермы, то всѣ точки *по правую* сторону отъ этой линіи будутъ представлять состоянія, при которыхъ все вещество нежидко. Теперь,

прилагая надлежащимъ образомъ теплоту и давленіе, мы можемъ *любымъ* путемъ, какой выберемъ (на діаграммѣ), перевести вещество изъ одного изъ этихъ состояній въ другое. Возьмемъ два пути: одинъ (А), лежащій совершенно внѣ пунктирной кривой, другой (В), пересекающій ее (дважды). Заставимъ газъ пройти путь В, и мы *увидимъ* его на извѣстномъ протяженіи пути раздѣленнымъ на паръ и жидкость. Возвратимся отъ несомнѣнно жидкаго состоянія къ несомнѣнно нежидкому по пути А. Ни на какой ступени процесса мы не найдемъ признаковъ того, чтобы вещество было частью въ одномъ молекулярномъ состояніи, частью въ другомъ.

Это однако вѣрно въ предположеніи, которое мы до сихъ поръ принимали для индикаторной діаграммы, а именно, что давленіе и температура одинаковы въ каждый моментъ по всей массѣ вещества, съ которымъ мы имѣемъ дѣло. Когда угольный ангидридъ находится въ состояніи, изображаемомъ точкою въблизи вершины пунктирной линіи, тогда малѣйшія разницы температуры или давленія въ различныхъ точкахъ массы производятъ чрезвычайныя различія въ оптическихъ свойствахъ; вся масса представляетъ, въ нѣсколько усиленной степени, то явленіе, которое наблюдается, если смотрѣть чрезъ столбъ воздуха, поднимающагося отъ нагрѣтаго тѣла, или сквозь сосудъ, въ которомъ сразу смѣшаны вода и крѣпкій соляной растворъ.

361. Отношеніе плотностей жидкаго угольнаго ангидрида и его насыщеннаго пара, какъ показываетъ діаграмма, есть около 5,7 : 1 при 13°,1 С. При 21°,5 отношеніе составляетъ только около половины этого. Такимъ образомъ относительные объемы очень легко изображаются графически.

Но въ случаѣ воды и насыщеннаго пара при какой-либо обыкновенной температурѣ отношеніе плотностей (приблизительно) есть $1600 : 1$. Чтобы сколько-нибудь приблизиться къ этому, мы должны взять угольный ангидридъ при очень низкихъ температурахъ. Поэтому нельзя построить умѣренныхъ размѣровъ діаграмму, которая вполне изображала бы изотермы вещества воды при тѣхъ температурахъ, для которыхъ Эндрюсъ далъ намъ изотермы угольнаго ангидрида. Съ другой стороны, діаграмма, нѣсколько сходная съ той, которая дана Эндрюсомъ, изображала бы изотермы воды при температурахъ выше 400°C .

362. Во всѣхъ этихъ случаяхъ изотермическія линіи вообще являются наклоненными въ правую сторону, т. е. если вещество удерживается при постоянной температурѣ, то увеличеніе объема влечетъ за собою уменьшеніе давленія, а увеличеніе давленія — уменьшеніе объема. Это означаетъ только то, что всѣ извѣстныя жидкости, въ какомъ бы состояніи онѣ ни были, сжимаются при повышеніи давленія, если температура удерживается неизмѣнною.

Кажущіяся исключенія представляютъ, конечно, спадающіяся или взрывчатые тѣла, которыя внезапно и рѣзко мѣняютъ свой объемъ подъ дѣйствіемъ давленія, — кажущіяся исключенія потому, что въ этихъ случаяхъ необходимо нарушается условіе изотермичности.

Дѣйствительное исключеніе представляетъ случай насыщеннаго пара въ присутствіи жидкости, ибо здѣсь давленіе остается постояннымъ при измѣненіи объема — какъ при уменьшеніи, такъ и при увеличеніи его. Это, конечно, обусловлено тѣмъ, что часть вещества испи-

измѣненіе молекулярнаго состоянія, сопрово-

ждающееся рѣзкимъ измѣненіемъ объема и значительнымъ поглощеніемъ или выдѣленіемъ теплоты; для выполненія же условія, представляемаго изотермою, необходимо настолько медленное измѣненіе объема, чтобы производимое тѣмъ самымъ измѣненіе температуры могло быть предотвращено сообщеніемъ теплоты извнѣ или ея отнятіемъ.

363. Адиабатическія линіи ни для какого вещества не могутъ быть построены на основаніи результатовъ прямого опыта, просто потому, что невозможно сдѣлать совершенно непроводящій сосудъ для этихъ опытовъ. Однако, можно вычислить ихъ форму для той или другой группы веществъ при помощи теоріи изъ результатовъ такихъ опытовъ, которые могутъ быть выполнены. Но мы отлагаемъ это въ настоящее время.

364. Пока мы можемъ предположить, но только для цѣлей разсужденія (§ 86), что вещество заключено въ цилиндръ, который можетъ быть, по желанію, сдѣланъ или совершеннымъ проводникомъ или совершеннымъ непроводникомъ теплоты. Допустимъ, что цилиндръ окруженъ нѣкоторою массою совершенно проводящей жидкости, удѣльная теплота которой такъ велика, что температура жидкости практически не измѣняется вслѣдствіе того или другого обмѣна теплоты между ею и содержимымъ цилиндра. Тогда индикаторъ, будучи присоединенъ къ поршню, начертитъ или изотерму, или адиабату, смотря по тому, будутъ ли стѣнки цилиндра проводящими или нѣтъ.

365. Теперь положимъ, что вещество при сжиманіи выдѣляетъ теплоту. Пусть поршень будетъ вдавливаемъ въ цилиндръ. Если цилиндръ проводитъ, то развивающаяся теплота тотчасъ удаляется; но давленіе при этомъ

вообще повышается, какъ мы видѣли въ § 362. Если цилиндръ не проводить, то дѣйствіе будетъ то же, какъ если бы веществу, котораго давленіе уже повышено посредствомъ (изотермическаго) сжатія, сообщено было еще нѣкоторое количество теплоты. причемъ веществу не дана возможность измѣняться въ объемѣ. Въ тѣхъ тѣлахъ, которыя мы здѣсь имѣемъ въ виду, дѣйствіе выразится дальнѣйшимъ повышеніемъ давленія. Такимъ образомъ, *адиабатическая линия, проходящая чрезъ какую-либо точку діаграммы, болѣе наклонена къ оси объемовъ, чѣмъ соответствующая ей изотерма.*

366. То же справедливо и тогда, когда вещество, какъ напр. вода между 0° и 4° C, относится къ числу тѣхъ, которыя охлаждаются дѣйствіемъ давленія, потому что сжимаются при нагрѣваніи. Ибо если цилиндръ есть проводникъ, то теплота проходитъ чрезъ него къ веществу, и такимъ образомъ его давленіе становится меньше, чѣмъ въ случаѣ адиабатики, когда теплотѣ не даютъ проникать внутрь.

Положеніе справедливо и тогда, когда мы имѣемъ дѣло съ жидкостью и ея насыщеннымъ паромъ, взятыми вмѣстѣ. Ибо давленіе сжижаетъ нѣсколько пара и освобождаетъ его скрытую теплоту. Если теплотѣ предоставляють удалаться по мѣрѣ ея развитія, то давленіе остается постояннымъ. Но при адиабатическомъ сжатіи давленіе должно, вслѣдствіе нагрѣванія, возрасти съ уменьшеніемъ объема.

Положеніе примѣнимо также къ случаю смѣси льда и воды. Ибо здѣсь ледъ плавится, такъ какъ онъ занимаетъ большій объемъ, чѣмъ происходящая изъ него вода, и масса въ цѣломъ охлаждается вслѣдствіе скрытой теплоты, потребной для образованія воды. Если те-

плотѣ позволяютъ проникать внутрь, такъ чтобы первоначальная температура поддерживалась, то большее количество льда расплавится, и давленіе вслѣдствіе этого будетъ понижено.

367. Эти явленія представляютъ примѣры общаго закона, который былъ формулированъ независимо разными физиками. Такъ, Гельмгольцъ говоритъ по поводу дѣйствія давленія на смѣсь льда и воды: «Здѣсь механическое давленіе, какъ то бываетъ въ большинствѣ случаевъ взаимодѣйствія разныхъ силъ природы, способствуетъ произведенію того измѣненія, таянія, которое благопріятно развитію его собственнаго дѣйствія» (т. е. дѣйствія давленія).

Клеркъ-Максвелль, говоря о болѣе крутомъ подъемѣ адиабатикъ сравнительно съ изотермами, выражается такъ: «Это есть примѣръ того общаго принципа, что если состояніе тѣла измѣняется какимъ-либо образомъ посредствомъ приложенія силы въ какой-либо формѣ, и если въ одномъ случаѣ тѣло подвержено нѣкоторому принужденію, а въ другомъ отъ него свободно, но во всемъ остальномъ находится въ сходныхъ условіяхъ, то въ случаѣ, если тѣло въ теченіе измѣненія воспользуется своею свободой—потребуется меньше силы для произведенія измѣненія, чѣмъ когда тѣло подвержено принужденію».

368. Каждая точка діаграммы соотвѣтствуетъ вообще одному совершенно опредѣленному состоянію работающаго вещества и, слѣдовательно, чрезъ нее можно провести только одну изотерму и одну адиабатику. Адиабатика (какъ мы видимъ изъ §§ 365, 366) *пересѣкаетъ* изотерму сверху внизъ и въ направленіи къ правой сторонѣ діаграммы.

Но въ нѣкоторыхъ особенныхъ случаяхъ одна и та же точка діаграммы можетъ соотвѣтствовать болѣе чѣмъ одному существенно отличному состоянію вещества. Каждое изъ этихъ состояній имѣетъ свою собственную изотерму и свою собственную адиабатику; такимъ образомъ говорятъ иногда, что двѣ или болѣе изотермы или адиабатики взаимно пересѣкаются.

Такіе случаи должно разсматривать собственно какъ примѣры, въ которыхъ одна часть діаграммы *лежитъ надъ* другою, такъ что (подобно контурнымъ линіямъ свѣшивающагося внизъ утеса), хотя въ діаграммѣ онѣ опредѣляются тѣми же самыми прямоугольными координатами—обѣ части лежатъ въ областяхъ, которыя должно считать совершенно отличными одна отъ другой.

Это будетъ ясно, если мы разсмотримъ отношеніе между объемомъ и температурою воды при обыкновенномъ атмосферномъ давленіи. Мы знаемъ (§ 121), что объемы воды одинаковы при 2°C и около 6°C . Поэтому изотермы воды для 2°C и 6°C должны пересѣкаться въ точкѣ, опредѣляемой одной атмосферой давленія и объемомъ 1,00003. Но если мы представимъ себѣ водяной термометръ, то найдемъ, что шкала такого инструмента была бы *изогнута надвое*: низшая точка была бы 4°C (точка наибольшей плотности), и отчеты шкалы или бы отъ этой точки вверхъ при повышеніи температуры до 5° , 6° , ..., но *также вверхъ* при пониженіи температуры до 3° , 2° , ... Это будетъ не одна шкала, а двѣ различныя части шкалы, изогнутой надвое. Подобнымъ образомъ мы должны разсматривать тѣ соотвѣтственныя части индикаторной діаграммы, о которыхъ упомянуто выше.

369. Поэтому въ нижеслѣдующихъ разсужденіяхъ

мы будемъ разсматривать системы изотермъ и адиабатикъ, какъ группы непересекающихся кривыхъ, при томъ такихъ, что каждая кривая одной группы пересекаетъ однажды, и только однажды, каждую кривую другой группы. Если пересекаются двѣ кривыя одной и той же группы, то ихъ должно считать лежащими въ совершенно различныхъ областяхъ, хотя онѣ и изображены въ одной и той же части діаграммы.

370. Здѣсь должно сдѣлать еще одно замѣчаніе. Мы видѣли (§ 358), что наше непосредственное знаніе формы изотермъ ограничено ихъ среднею областью, гдѣ объемъ вещества не очень великъ и не очень малъ. То же самое вѣрно по отношенію къ адиабатическимъ линіямъ, о которыхъ наши свѣдѣнія еще менѣе полны, такъ какъ менѣе непосредственны. Но намъ предстоитъ рассмотретьъ площадь (конечныхъ размѣровъ, какъ будетъ показано), заключающуюся между конечнымъ отрѣзкомъ изотермы и двумя адиабатиками, идущими отъ концовъ этого отрѣзка вправо. Въ виду этого желательно имѣть способъ пополненія нашей діаграммы, хотя бы онъ былъ несовершененъ и даже (какъ могли бы показать послѣдующіе опыты) ошибоченъ, лишь бы онъ не ввелъ насъ въ заблужденіе въ томъ специальномъ разсмотрѣніи, для котораго онъ придуманъ и для котораго *единственно* онъ и долженъ быть употребляемъ. Клеркъ-Максвелль предложилъ слѣдующій способъ, который, будучи удобнымъ и достаточнымъ для нашего отдѣльнаго случая, такъ явно невѣренъ въ подробностяхъ, что нельзя опасаться ввести имъ кого-либо въ заблужденіе.

Пусть $RR'R''$ (см. ниже рис. 52, § 374) будетъ изотерма для низшей температуры, которой форма намъ известна, QR , $Q'R'$, $Q''R''$,.... адиабатическія линіи. Про-

ведемъ *какую-нибудь* линію $SS'S''$ и назовемъ ее (для нашей временной цѣли) изотермою абсолютнаго нуля. Тогда ясно, что мы можемъ провести (безчисленнымъ множествомъ способовъ) линіи RS , $R'S'$, $R''S''$, такъ, чтобы криволинейныя площади $RR'S'S$, $R'R''S''S'$ и т. д. имѣли какую-нибудь опредѣленную конечную величину.

371. Прибѣгнемъ теперь къ *обратимому круговому процессу* Карно, дабы истолковать діаграмму въ смыслѣ двухъ законовъ термодинамики

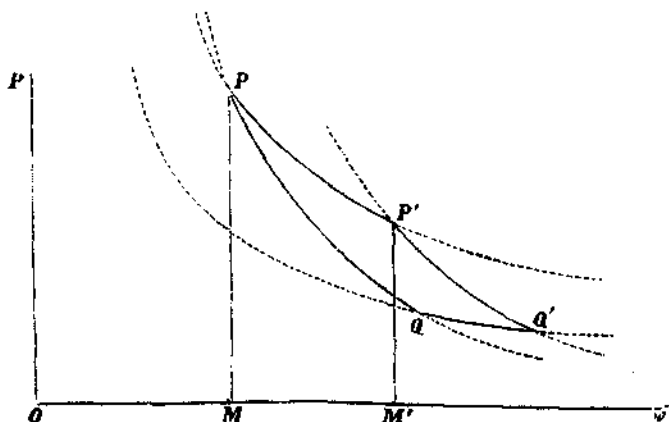


Рис. 51.

Пусть PP' будетъ изотерма работающаго вещества при температурѣ t_1 теплаго тѣла (операция 2), QQ' — его изотерма при температурѣ t_0 холоднаго тѣла (операция 4); а QP и $P'Q'$ пусть будутъ адиабатики, соответствующія первой и третьей операциямъ. Кроме того, пусть H_1 и H_0 будутъ количества теплоты, принятой и отданной при прямомъ ходѣ процесса. Тогда, по опредѣленію абсолютной температуры (§ 95), мы имѣемъ

$$\frac{H_1}{t_1} = \frac{H_0}{t_0}.$$

Такъ какъ процессъ обратимъ, то нѣтъ никакого перехода теплоты помимо этихъ двухъ, и слѣдов. произведенная работа эквивалентна избытку теплоты, доставленной источникомъ, надъ теплотою, отданною холодильнику. Если мы для удобства будемъ измѣрять теплоту динамическими единицами, то мы скажемъ «равна» вмѣсто «эквивалентна». [Эквивалентъ Джоуля, первоначально имъ данный (§ 37), былъ 772 футофунта для тепловой единицы, отвѣчающей градусу Фаренгейта. Это составитъ около 1390 фт.-фн.¹⁾ для градуса столбчатого термометра]. При такомъ условіи и принимая во вниманіе предложеніе § 351, мы имѣемъ

$$H_1 - H_0 = \text{площади } PP'Q'Q.$$

372. Такъ какъ величина изотермическаго расширенія, отъ P до P' , можетъ быть какая угодно, то для простоты мы предположимъ ее взятою такъ, чтобы численно (единица теплоты есть теперь футофунтъ)

$$H_1 = t_1.$$

Опредѣленіе абсолютной температуры даетъ

$$H_0 = t_0;$$

такъ что при нашей теперешней системѣ единицъ мы имѣемъ

$$t_1 - t_0 = \text{площади } PP'Q'Q.$$

373. Теперь мы подготовлены къ тому, чтобы сдѣлать научный выборъ нашей системы изотермъ и адиабатъ

¹ 424 килограмметра.

тическихъ линій и такимъ образомъ установить значенія различныхъ градусовъ шкалы абсолютной температуры.

Идя вдоль изотермы PP' на прилагаемой діаграммѣ (рис. 52), отмѣтимъ послѣдовательно добавочныя точки $P'', P''', \dots$ такъ, чтобы при переходѣ отъ P' къ P'' , отъ P'' къ P''' и т. д., также какъ и отъ P къ P' , воспринималось t_1 единицъ теплоты. Черезъ точки $P'', P''', \dots$ проведемъ адиабатики, пересѣкающія QQ' въ Q'', Q''' и т. д. Тогда ясно, что число единицъ теплоты, отдаваемое при переходѣ отъ Q'' къ Q' или отъ Q''' къ Q'' и т. д. (какъ и отъ Q' къ Q) будетъ t_0 . Слѣдовательно, $t_1 - t_0 = \text{площади } PP'Q'Q = \text{площади } P'P''Q''Q' = \text{площади } P''P'''Q'''Q'' = \text{и т. д.}$ И это справедливо, каково бы ни было значеніе t_0 .

Если поэтому мы предположимъ, что t_0 на *одинъ градусъ* ниже t_1 , такъ что $t_1 - t_0 = 1$, то каждая изъ площадей $PP'Q'Q$, $P'P''Q''Q'$, ... будетъ равна единицѣ. И третья изотерма, двумя градусами ниже t_1 , будетъ однимъ градусомъ ниже t_0 и такимъ образомъ, пересѣкая адиабатическія линіи, дастъ новый рядъ площадей единичной величины.

Вся изслѣдованная часть поля можетъ быть такимъ образомъ раздѣлена на единичныя площади посредствомъ системы только что описанныхъ адиабатическихъ линій и ряда изотермъ для послѣдовательныхъ градусовъ температуры. Но длина одного градуса остается еще совершенно произвольною, хотя достаточно дать ее для *одной какой-либо части шкалы*, чтобы вся система сдѣлалась опредѣленною.

374. Площадь, содержащаяся между двумя послѣдовательными адиабатиками этого ряда и двумя какими

либо изотермами, следовательно, имѣть мѣрою число, выражающее разность между абсолютными температурами изотермъ.

[Здѣсь мы прямо видимъ одно изъ большихъ достоинствъ процесса Карно. Ибо только что сказанное совершенно не зависитъ отъ природы работающаго вещества].

Эта площадь изображаетъ, какъ мы видѣли, избытокъ сообщенной теплоты надъ отданной. Поэтому его наибольшая величина, когда ниже лежащая изотерма

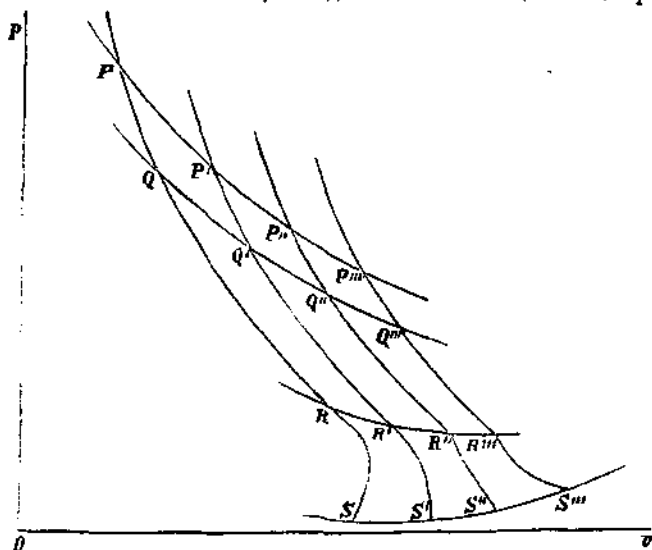


Рис. 52.

есть изотерма абсолютнаго нуля, будетъ конечною величиною, представляющею всю сообщенную теплоту. Если $RR'R''R'''$ есть низшая изотерма, которой форма извѣстна, то мы можемъ (какъ въ § 370) принять какую-нибудь линію $SS'S''S'''$ за изотерму абсолютнаго

нуля; линіи RS , $R'S'$, $R''S''$ и т. д. должны быть проведены такъ, чтобы каждая изъ площадей $PP'Q'R'S'SRQ$, $P'P''Q''R''S''S'R'Q'$,.... равнялась t_1 .

Изъ сказаннаго выше прямо видно, что какая бы изотерма ни изображалась линіей $QQ'Q''Q'''$, площади $QQ'R'S'SR$, $Q'Q''R''S''S'R'$,.... также должны быть равны между собою. Поэтому абсолютныя температуры какихъ либо двухъ изотермъ PP' и QQ' относятся другъ къ другу, какъ полныя площади $PP'Q'R'S'SRQ$ и $QQ'R'S'SR$. Определеніе отношенія этихъ площадей, когда PP' и QQ' отвѣчаютъ какимъ-либо двумъ определеннымъ температурамъ, каковы температуры кипѣнія воды и таянія льда подъ давленіемъ одной атмосферы, есть исполнѣ дѣло опыта. (Мы увидимъ позже, какъ были выполнены такіе опыты). Въ результатъ для этихъ двухъ температуръ Джоулемъ и Томсономъ найдено отношеніе около $1,365:1$. (*Phil. Trans.* 1854).

375. Теперь примемъ стоградусную шкалу, но исключительно для того, чтобы раздѣлить промежутокъ между точками замерзанія и кипѣнія на 100 градусовъ, *будутъ-ли эти градусы тождественны съ градусами ранѣе принятой нами шкалы (§ 61) или нѣтъ*, и пусть x будетъ по нашей новой шкалѣ абсолютная температура таянія льда, а $x+100$ температура кипѣнія воды; тогда

$$(x + 100): x = 1,365 : 1.$$

Отсюда, какъ уже указано выше, мы имѣемъ очень близко $x = 274$.

376. Это можно высказать слѣдующимъ вразумительнымъ образомъ:

Если обратимая машина работает между температурами кипѣнія и замерзанія воды, то она отдаетъ

холодильнику 274 единицы теплоты на каждыя 374, принятыя ею отъ котла.

Или, вводя практическій терминъ *полезное дѣйствіе*, котораго мѣрою служить дробь отъ раздѣленія количества теплоты, превращенной въ работу, на количество всей воспринятой теплоты, мы можемъ сказать: *Полезное дѣйствіе совершенной машины, работающей между температурами кипѣнія и замерзанія воды, есть $\frac{100}{374}$* .

Полезное дѣйствіе, конечно, возрастаетъ съ увеличеніемъ отношенія высшей абсолютной температуры къ низшей.

На практикѣ даже самыя лучшія машины далеко уступаютъ этой въ полезномъ дѣйствіи. Какъ прекрасный примѣръ, Джоуль даетъ намъ слѣдующія числа для хорошей паровой машины высокаго давленія.

Если машина работаетъ при давленіи въ $3\frac{1}{2}$ атмосферы (около 53 фунт. вѣса на квадратный дюймъ), то температура котла должна быть около $300^{\circ}F$, и оказалось практически невозможнымъ удерживать холодильникъ при температурѣ низшей, чѣмъ приблизительно $110^{\circ}F$. Абсолютный нуль по Фарнгейтовой шкалѣ будетъ при $-274. \frac{180}{100} + 32 = -461^{\circ}F$ приблизительно.

Поэтому даже теоретическое полезное дѣйствіе есть лишь $\frac{190}{761}$, или почти $\frac{1}{4}$. *Въ действительности полезное дѣйствіе рѣдко болѣе половины этого.*

377. Вернемся къ нашей діаграммѣ, § 374 (рис. 52) Абсолютная температура t совершенно опредѣляетъ изотерму, если мы знаемъ работающее вещество. Пусть φ будетъ соотвѣтственная характеристическая величина для адиабатки, т. е. та величина, которая имѣетъ одинаковое значеніе для всѣхъ точекъ адиабатической линіи.

Ранкинъ первый назвалъ эту величину *термодинамической функцией*, а Клаузиусъ потомъ назвалъ *энтропией*. Очевидно, что φ зависитъ нѣкоторымъ образомъ отъ теплоты, которая сообщена тѣлу или отнята отъ него, ибо величина φ постоянна только тогда, когда нѣтъ прямого пріобрѣтенія или расхода теплоты.

И мы тотчасъ видимъ изъ равенства

$$\frac{H_1}{t_1} = \frac{H_0}{t_0},$$

которое вѣрно для всѣхъ значеній t_1 и t_0 , что величину, на которую φ возрастаетъ при переходѣ отъ одной адиабатики къ другой вдоль изотермы, прямо можно *опредѣлить*, какъ общее значеніе этихъ двухъ равныхъ величинъ. Поэтому, такъ какъ въ нашемъ исходномъ методѣ проведенія группы адиабатическихъ линий (§ 372) мы приняли H_1 численно равнымъ t_1 , то значеніе φ возрастаетъ на единицу при переходѣ отъ одной адиабатики къ слѣдующей.

378. Идя обратно чрезъ группу адиабатическихъ линий вдоль изотермы t , мы отнимаемъ t единицъ теплоты соответственно уменьшенію φ на каждую единицу. Это подаетъ мысль измѣрять φ отъ нѣкотораго нуля, при которомъ вещество болѣе неспособно отдавать теплоту. Въ дѣйствительности однако мы измѣряемъ φ (какъ въ динамикѣ измѣряемъ потенціалъ) отъ нѣкотораго условнаго начала. Ибо дѣло идетъ главнымъ образомъ только объ измѣненіяхъ, а не о дѣйствительномъ значеніи φ .

Итакъ положимъ, что мы взяли для этого опредѣленную точку на діаграммѣ за начало. Проведемъ соответственную изотерму, положимъ t_0 , и продолжимъ ее до пересѣченія съ тою адиабатикой, для которой нужно

измѣрить φ . Пусть вещество расширяется или сжимается адиабатически до тѣхъ поръ, пока его температура не будетъ t_0 , и пусть затѣмъ его объемъ измѣняется изотермически, пока не будетъ достигнуто состояніе, отвѣчающее принятому началу. Если H —теплота, отданная въ теченіе этой послѣдней операціи, то мы имѣемъ

$$\varphi = \frac{H}{t_0}.$$

Здѣсь H можетъ быть отрицательно—въ такомъ случаѣ и φ отрицательно.

Слѣдовательно, если вещество измѣняетъ свое состояніе изотермически при температурѣ t отъ φ_0 до φ , то оно принимаетъ количество теплоты, изображаемое

$$t (\varphi - \varphi_0).$$

Если оно снова приводится къ прежнему состоянію φ_0 вдоль изотермы t_0 , то оно отдаетъ количество теплоты равное

$$t_0 (\varphi - \varphi_0).$$

Въ циклѣ Карно, ограниченномъ t , φ , t_0 , φ_0 , избытокъ воспринятой теплоты надъ отданной, т. е. произведенная работа, или площадь діаграммы цикла, слѣдовательно, есть

$$(t - t_0) (\varphi - \varphi_0).$$

379. Измѣненія въ полной энергіи вещества также можно представить на діаграммѣ. [Полная энергія какого-либо вещества есть величина, которую мы не имѣемъ средствъ опредѣлить. Мы можемъ сказать (§ 220), сколько энергіи принимается и сколько отдается, а также въ какой формѣ энергія принимается и отдается, но не болѣе.

Къ счастью, только это и нужно намъ для практическихъ приложений].

Пусть точка P диаграммы (рис. 53) представляет начальное состояніе вещества, а PQ —адиабатику, соответствующую P . Если теперь состояніе будетъ измѣнено (какимъ либо путемъ) въ другое, отвѣчающее точкѣ P' , то тѣло произведетъ работу (т. е. потеряетъ въ энергіи), если P' лежитъ вправо отъ MP , вмѣстѣ съ тѣмъ оно отдастъ часть теплоты (опять потеря энергіи), если P' лежитъ ниже PQ . [Мы возьмемъ это какъ образцовый случай. Небольшое разсмотрѣніе покажетъ, какія перемѣны произойдутъ въ случаѣ, если P' лежитъ влѣво отъ

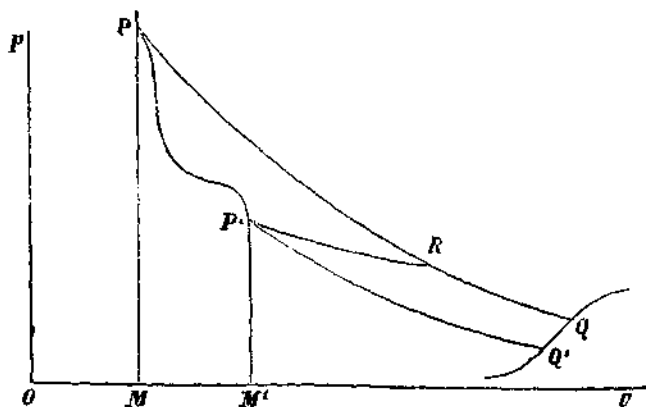


Рис. 53.

MP или выше PQ]. Проведемъ прямую $P'M'$, адиабатику $P'Q'$, и пусть QQ' будетъ (произвольная) линія, соответствующая $SS'S''S'''$ въ § 370. Тогда площадь $PP'M'M$ представитъ произведенную работу, а $PQQ'P'$ — отданную теплоту (§ 374), то и другое въ динамическихъ единицахъ. Слѣдовательно, площадь $PQQ'P'MM$ изобра-

жаетъ всю потерю энергіи при переходѣ отъ состоянія P въ состояніе P' и, очевидно, не зависитъ отъ формы пути PP' .

Но необходимо замѣтить, что величина каждой изъ отдѣльных частей, т. е. произведенной работы и отданной теплоты, вообще зависитъ отъ формы пути. Это замѣчаніе въ высшей степени важно, такъ какъ оно позволяетъ намъ изображать графически количества теплоты, потраченныя какъ необходимымъ образомъ, такъ и бесполезно, въ теченіе того или другого пути, пройденнаго веществомъ. Если, напримѣръ, мы предположимъ, что работающему веществу не сообщается теплоты, то путь PP' не можетъ пройти гдѣ-либо *выше* PQ . Далѣе, если P' отвѣчаетъ нижайшей температурѣ, которой мы можемъ воспользоваться, то PP' не можетъ лежать гдѣ-либо *ниже* изотермы $P'R$. Такимъ образомъ, наибольшее количество работы, которое можетъ быть получено при переходѣ отъ одного даннаго состоянія къ другому, будетъ соответствовать адиабатическому расширенію вдоль PQ , соединенному съ послѣдующимъ сжатіемъ вдоль изотермы до P' . На пути PP' площадь $P'RQ'Q'$ представляетъ теплоту, затраченную полезнымъ образомъ, а PRP' —затраченную бесполезно.

380. Мы видимъ отсюда, что усовершенствованная діаграмма съ проведенными надлежащимъ образомъ группами изотермъ и адиабатическихъ линій позволяетъ намъ изображать одновременно измѣненія объема, давленія, температуры и принимаемыя или отдаваемыя количества теплоты, также какъ и величину произведенной работы и измѣненія въ полной энергіи. Такимъ образомъ замѣчаніе § 349 о важномъ значеніи разработанной діаграммы вполне оправдывается.

Мы могли бы, слѣдуя Ранкину и Клеркъ-Максвеллю, развить гораздо далѣе приложенія діаграммы (см. особенно статью Ранкина, *Phil. Trans.* 1854, и главы IX—XIII *Theory of Heat* Максвелля) и вывести на основаніи данныхъ выше свойствъ ея, помощью однихъ только геометрическихъ методовъ, соотношенія между различными физическими свойствами даннаго вещества. Это и выполнилъ талантливо Максвелль, пользуясь различными выраженіями для единичной площади элементарнаго параллелограмма (§ 373) между двумя послѣдовательными адиабатиками и двумя послѣдовательными изотермами. Но опытъ показалъ намъ, что, какъ ни изящны, просты и доказательны эти методы, они значительно труднѣе (для тѣхъ изъ учащихся, которые вообще способны понимать ихъ), нежели аналитическіе методы.

Кто захочетъ вполне освоиться съ термодинамической теоріей, тотъ не обойдется безъ изученія книги Максвелля; но можно кое-чему научиться и лучше подготовиться къ дальнѣйшему изученію, начавъ разсмотрѣніемъ элементовъ теоріи съ простой аналитической точки зрѣнія.

381. Къ сожалѣнію, очень распространено мнѣніе (конечно, только между тѣми, которые не пытались узнать дѣло ближе), что дифференціальное исчисленіе, даже въ его элементахъ, есть нѣчто ужасно премудрое. Но если кого либо изъ думающихъ такъ—что *иногда* бываетъ—удается убѣдить отнестись внимательнѣе, тотъ очень скоро увидитъ, что многіе мыслительные процессы, къ которымъ онъ (если онъ по-просту не идіотъ) привыкъ съ самаго дѣтства, основаны на первыхъ элементахъ этого устрашающаго исчисленія. иногда на болѣе отвле-

ченныхъ частяхъ его. Такого рода людей мы не можемъ и не хотимъ здѣсь принимать во вниманіе.

382. *Содержаніе* §§ 349—381. Индикаторъ Уатта. Индикаторная діаграмма. Какъ она изображаетъ работу. Изотермическія и адиабатическія линіи. Тѣ же линіи, разсматриваемыя какъ послѣдовательныя параллельныя сѣченія поверхности. Изотермы воздуха, угольнаго ангидрида, воды. Адиабатки круче изотермъ. Круговой процессъ Карно на діаграммѣ. Абсолютная температура. Полезное дѣйствіе тепловой машины. Термодинамическая функція, энтропія. Полная энергія.

ГЛАВА XXI.

Начала термодинамики.

383. Въ предыдущей главѣ мы представили помощью индикаторной діаграммы многія термическія свойства отдѣльныхъ веществъ и нѣкоторыя ихъ соотношенія, которыхъ существованіе раскрыто было приложеніемъ законовъ термодинамики. Величины, въ функціи которыхъ мы выражали состояніе вещества, были прежде всего v (объемъ) и p (давленіе) единицы массы вещества.

Далѣе мы видѣли, что вся изслѣдованная часть діаграммы можетъ быть раздѣлена на равныя площади (любой величины) посредствомъ надлежащимъ образомъ проведенныхъ изотермическихъ и адиабатическихъ линий, такъ что состояніе тѣла столь же хорошо можетъ быть выражено въ функціи t (абсолютной температуры) и φ (термодинамической функціи, или энтропіи).

Но легко видѣть, что мы могли бы также выразить положеніе точки (т. е. состояніе вещества) какою-либо другою парой изъ этихъ четырехъ величинъ, т. е. въ функціи v и t , v и φ , p и t , или p и φ .

Мы видѣли также, что E , т. е. полная энергія (напомнимъ, что полная энергія тѣла намъ не извѣстна: величина E разнится отъ полной энергіи на нѣкоторую постоянную, которую мы отбрасываемъ) можетъ быть представлена въ функціи p и v и, слѣдовательно, въ функціи любой пары изъ четырехъ названныхъ величинъ. Отсюда мы усматриваемъ, что существуетъ три необходимыхъ соотношенія между пятью величинами

$$p, v, t, \varphi, E,$$

и что, слѣдовательно, всякія три изъ этихъ величинъ можно представить въ функціи двухъ остальныхъ.

Здѣсь мы разовьемъ аналитически наиболѣе элементарные результаты приложеній законовъ термодинамики и будемъ брать иногда одну, иногда другую пару изъ этихъ пяти величинъ (соотвѣтственно нашей ближайшей или въ каждомъ случаѣ) за *независимыя переменныя*, въ функціи которыхъ будутъ выражаемы остальные.

384. Начинаемъ съ выраженій для энергіи. За этотъ предметъ взялся въ 1851 году В. Томсонъ.

Если при давленіи p объемъ вещества измѣняется отъ v въ $v + dv$, то произведенная работа (соотвѣтствующая опредѣленному расходу энергіи) есть

$$p dv.$$

Если въ то же время вещество при средней температурѣ t переходитъ отъ адиабатики φ къ ближайшей $\varphi + d\varphi$, то оно должно принять (т. е. приобрести энергіи на) количество теплоты равное

$$t d\varphi$$

— въ динамическихъ единицахъ (§§ 371, 378).

Такимъ образомъ, для измѣненія энергіи мы имѣемъ

$$dE = t d\varphi - p dv \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Отсюда E можно рассматривать, какъ такую функцію двухъ независимыхъ переменныхъ v и φ , которой частныя производныя суть

$$\left(\frac{dE}{dv}\right) = -p, \quad \left(\frac{dE}{d\varphi}\right) = t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2).$$

385. Эти уравненія показываютъ намъ, что

а) Расходъ энергій, соответствующій возрастанію объема на единицу, при адиабатическомъ расширеніи измѣряется давленіемъ.

б) Если вещество удерживается при постоянномъ объемѣ, то прибыль энергій, соответствующая возрастанію энтропіи на единицу, измѣряется абсолютной температурой. Или, что то же, при постоянномъ объемѣ прибыль энергій измѣряется сообщенною теплотою.

386. Изъ ур. (2) помощью частнаго дифференцірованія мы находимъ

$$-\left(\frac{dp}{d\varphi}\right) \left[= \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{dE}{dv}\right) = \frac{d}{dv} \left(\frac{dE}{d\varphi}\right) \right] = \left(\frac{dt}{dv}\right).$$

Чтобы истолковать это уравненіе, умножимъ и раздѣлимъ лѣвую часть его на t , и мы получимъ: паденіе температуры съ увеличеніемъ объема на единицу при адиабатическомъ расширеніи равняется возрастанію давленія на каждую (динамическую) единицу теплоты, сообщенной при постоянномъ объемѣ,—умноженному на абсолютную температуру.

387. Выраженіе для dE [(1) § 384] состоитъ изъ двухъ частей, изъ которыхъ каждая отдѣльно не представляетъ полнаго дифференціала; ихъ же (алгебраическая) сумма необходимо есть полный дифференціалъ. См. § 379, гдѣ выяснены причины этого. И произведенная работа, и сообщенная теплота зависятъ каж-

дая отъ формы пути (т. е. отъ послѣдовательности состояній, чрезъ которыя вещество проходитъ), а эта форма совершенно произвольна. Измѣненіе же энергій, напротивъ, зависитъ лишь отъ начального и конечнаго состояній вещества.

388. Прикладывая различные полные дифференціалы къ обѣимъ сторонамъ (1) мы можемъ замѣнить независимыя переменныя на любую другую пару: v и t , p и φ , p и t . И изъ полученныхъ результатовъ мы можемъ, какъ прежде, сдѣлать опредѣленные заключенія объ отношеніяхъ между термическими свойствами даннаго вещества.

389. Такъ мы имѣемъ для v и t , взятыхъ за независимыя переменныя

$$d(E - t\varphi) = -\varphi dt - p dv.$$

Приемъ совершенно сходный съ употребленнымъ въ § 386 даетъ отсюда

$$\left(\frac{dp}{dt}\right) = \left(\frac{d\varphi}{dv}\right).$$

По умноженіи обѣихъ сторонъ на t это означаетъ: скрытая теплота (изотермическаго) расширенія измѣняется произведеніемъ абсолютной температуры на приращеніе давленія, отвѣчающее при постоянномъ объемѣ повышенію температуры на единицу.

Положимъ, что мы имѣемъ водяной паръ въ присутствіи воды или воду въ присутствіи льда (т. е. одно и то же вещество въ двухъ состояніяхъ, изъ которыхъ одно отличается термически отъ другого скрытой теплою L единицы массы); пусть v_0 и v_1 будутъ объемы единицы массы вещества въ томъ и другомъ состояніи

при p , t , а $\frac{e}{1-e}$ отношеніе, въ которомъ единица массы вещества составлена изъ того и другого,

$$e = ev_0 + (1 - e)v_1.$$

Отсюда

$$\left(\frac{dp}{dt}\right) = \frac{1}{v_0 - v_1} \left(\frac{d^2\varphi}{de}\right).$$

Первая часть выражаетъ быстроту, съ которой должно измѣняться давленіе при измѣненіи температуры, чтобы не было измѣненія объема, т. е. чтобы не измѣнялось отношеніе между количествами обѣихъ частей вещества въ томъ и другомъ состояніи.

Вторая, по умноженіи на t , означаетъ теплоту, которая должна быть сообщена соответственно увеличенію объема на единицу при неизмѣняющейся температурѣ. Поэтому Lde , скрытая теплота, потребная для того измѣненія состоянія, которое изображается чрезъ de , должна быть равна $td\varphi$, т. е. сообщенной теплотѣ.

Такимъ образомъ предыдущее уравненіе принимаетъ видъ

$$\left(\frac{dp}{dt}\right) = \frac{L}{t(v_0 - v_1)},$$

или, для малыхъ одновременныхъ измѣненій давленія и температуры при обозначенныхъ условіяхъ,

$$\delta t = \frac{t(v_0 - v_1)}{L} \delta p.$$

Итакъ, когда $v_0 > v_1$ (какъ въ случаѣ пара и воды), температура повышается при повышеніи давленія; когда же $v_0 < v_1$ (какъ въ случаѣ воды и льда), температура смѣси при возрастаніи давленія понижается.

390. Приведенная выше формула означаетъ то же самое, какъ та, которая дана Дж. Томсономъ въ 1842 г.

(§ 142) на основаніи лишь начала Карно. Примѣнимъ ее къ одному численному выводу. Кубическій футъ воды при 0°C вѣситъ около 62,5 фунтовъ. Слѣдовательно, объемъ фунта воды составляетъ около 0,016 кубич. фута. Плотность льда (§ 145) есть 0,92, такъ что объемъ фунта льда равенъ $[0,016 : 0,92 =] 0,0174$ кубич. фута. Скрытая теплота воды (§ 151) составляетъ 79,25 тепловыхъ единицъ; число это для превращенія въ футофунты должно быть умножено на эквивалентъ Джоуля, 1390 (§ 371). Одна атмосфера давленія составляетъ около 2117 фунтовъ вѣса на квадратный футъ. Отсюда, вычисляя по формулѣ, мы находимъ, что точка замерзанія понижается на

$$0^{\circ},0074\text{C}$$

на каждую атмосферу давленія.

391. Мы не можемъ непосредственно приложить этотъ приемъ для вычисленія результата въ случаѣ воды и водяного пара, ибо опредѣленіе плотности насыщеннаго водяного пара при различныхъ температурахъ представляетъ громадныя экспериментальныя трудности. Но, взявъ соотвѣтствующія значенія $\delta\rho$ и δt изъ таблицы Реньо (§ 164), а L изъ § 166, мы можемъ примѣнить формулу для вычисленія объема одного фунта насыщеннаго водяного пара при какой либо температурѣ.

Но легко получить интересный выводъ, принадлежащій Равкину и Клаузіусу. Пусть c_0 и c_1 (функции только отъ t) будутъ удѣльныя теплоты какого либо вещества въ его двухъ состояніяхъ, насыщеннаго пара и жидкости, въ одномъ и томъ же сосудѣ. Тогда, припомнивъ, что состояніе единицы массы вещества вполне характеризуемо величинами t и c , мы имѣемъ для теплоты потребной для измѣненія ихъ въ $t + dt$ и $c + dc$

$$td\varphi = [c_0 e + c_1(1-e)]dt + Lde \quad . \quad . \quad (1).$$

Отсюда

$$\frac{d^2\varphi}{dt\,de} = \frac{d}{de} \left(\frac{c_0 e + c_1(1-e)}{t} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{L}{t} \right);$$

или

$$c_0 - c_1 = \frac{dL}{dt} - \frac{L}{t}.$$

По § 166, dL/dt для водяного пара (приблизительно) $= -0,7$, и такъ какъ для воды $c_1 = 1$, то $dL/dt + c_1 = -0,3$. Но L/t имѣетъ значенія 2,2; 1,4; 0,98 — при 0° , 100° и 200°C соответственно. Мы, слѣдовательно, находимъ, что c_0 отрицательно. Поэтому, такъ какъ (§ 393) мѣсь воды и пара нагрѣвается при сжатіи, то въ написанномъ выше ур. (1) dt положителенъ. Итакъ, при адиабатическомъ сжатіи смѣси воды и пара не будетъ ни испаренія, ни сгущенія, если $(c_1 - c_0)e = c_1$. Если паръ находится въ избыткѣ противъ этого отношенія, то происходитъ испареніе, въ противномъ случаѣ — сгущеніе. Насыщенный паръ, въ отсутствіи воды, становится перегрѣтымъ паромъ при адиабатическомъ сжатіи.

Точно также, если насыщенному водяному пару предоставить расширяться въ сосудѣ непроницаемомъ для теплоты, то паръ охлаждается настолько, что остается при температурѣ насыщенія и, кромѣ того, часть его сгущается въ воду.

Этотъ результатъ кажется съ перваго взгляда противорѣчающимъ давно извѣстному парадоксальному опыту, что паръ высокаго давленія, выходящій въ воздухъ чрезъ узкое отверстіе, не обжигаетъ руки и даже лица, если на нихъ направить струю; напротивъ, паръ низкаго давленія причиняетъ страшные обжоги. В. Томсонъ разрѣшилъ затрудненіе, объяснивъ дѣло такъ. Паръ,

стремящийся чрезъ отверстіе, производитъ механическую работу, тотчасъ расходующуюся на внутреннее треніе жидкости и, слѣдовательно, *превращаемую обратно въ теплоту*, откуда по числовымъ даннымъ Ренъо слѣдуетъ, что вытекающій паръ (въ случаѣ пара высокаго давленія, но не низкаго) долженъ быть при температурѣ выше 100°C и быть *сухимъ* паромъ.

392. Далѣе, изъ нашего основнаго уравненія мы имѣемъ

$$d(E + pv) = t d\varphi + v dp,$$

откуда, какъ прежде,

$$\left(\frac{dt}{dp}\right) = \left(\frac{dv}{d\varphi}\right).$$

По раздѣленіи обѣихъ частей на t это значитъ: возрастаніе объема на единицу теплоты, приданной при постоянномъ давленіи, равняется отношенію быстроты адиабатическаго измѣненія температуры съ давленіемъ къ абсолютной температурѣ.

393. Наконецъ,

$$d(E - t\varphi + pv) = -\varphi dt + v dp,$$

откуда

$$-\left(\frac{d\varphi}{dp}\right) = \left(\frac{dv}{dt}\right).$$

Умножая обѣ части на t , мы имѣемъ: количество теплоты, выдѣленное при возрастаніи давленія на единицу при постоянной температурѣ, равно произведенію изъ абсолютной температуры на величину измѣненія объема соотвѣтственно повышенію температуры на единицу при постоянномъ давленіи, т. е. равно произведенію изъ абсолютной температуры, объема и расширяемости.

Мы видимъ такимъ образомъ, что тѣла, расширяющіяся при нагреваніи, нагреваются при сжатіи, а тѣ, которыя сжимаются при нагреваніи (какъ вода ниже точки ея наибольшей плотности), охлаждаются при сжатіи.

394. Мы видѣли (§ 121), что для температуръ близкихъ къ точкѣ наибольшей плотности мы имѣемъ для воды

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{t-278}{72000}.$$

Поэтому количество теплоты, развивающееся въ единицѣ массы воды (въ этихъ приблизительно предѣлахъ температуры) на одну атмосферу давленія, въ динамическихъ единицахъ (см. § 390) есть

$$\frac{2117}{62.5 \times 72000} (t-278).$$

Слѣдовательно, производимое этою теплотою повышение температуры равно

$$\frac{2117}{62.5 \times 1390} \cdot \frac{(t-278)}{72000} = \frac{t(t-278)}{2950000}$$

приблизительно. Такимъ образомъ измѣненіе температуры, производимое въ водѣ при 0°Съ вслѣдствіе внезапнаго повышенія давленія до 150 атмосферъ (приблизно 1 милл. морской воды, или тонна вѣса на квадратный дюймъ), есть около

$$-0^{\circ}.055 \text{ C.}$$

395. Если k —удѣльная теплота вещества при постоянномъ давленіи, то мы имѣемъ для единицы массы

$$k dt = t d\tau$$

при условіи

$$dp = 0.$$

Если мы возьмемъ, какъ это обыкновенно дѣлается, c и t за независимыя переменныя, то эти уравненія можно написать такъ:

$$k dt = t \frac{dz}{dt} dt + t \frac{dz}{dr} dr$$

$$0 = \frac{dp}{dt} dt + \frac{dp}{dr} dr.$$

Но $t \frac{dz}{dt}$ очевидно, есть удѣльная теплота при постоянномъ объемѣ, положимъ c . Ибо это есть количество теплоты, сообщаемое при повышеніи температуры на одинъ градусъ, когда объемъ единицы массы вещества остается постояннымъ. Поэтому уравненія, по исключеніи отношенія dt къ dr на основаніи нашего условія, дадутъ

$$k - c = -t \frac{\frac{dz}{dr} \frac{dt}{dp}}{\frac{dp}{dr}} = -t \left(\frac{\frac{dp}{dt}}{\frac{dp}{dr}} \right)^2.$$

это выраженіе (такъ какъ по § 362 $\frac{dp}{dr}$ отрицательно), очевидно, всегда положительно. Оно прилагается ко всемъ веществамъ, въ которыхъ можетъ быть равновѣрное гидростатическое давленіе, но для совершеннаго газа оно принимаетъ чрезвычайно простую форму.

396. Мы рассмотримъ теперь термодинамическія отношенія совершеннаго газа, такъ какъ все они чрезвычайно просты и съ достаточною точностью прикладываются къ обыкновеннымъ предѣламъ температуры и давленія къ такимъ газамъ или газовымъ смѣсямъ, какъ водородъ, кислородъ, воздухъ и др.

Здѣсь (§ 126) мы имѣемъ основное условіе

$$pv = Rt.$$

Для нахождения формы адиабатики мы имѣемъ (§ 389)

$$\frac{d\varphi}{dv} = \frac{dp}{dt} = \frac{R}{v}.$$

Мы имѣемъ также

$$\frac{dp}{dv} = - \frac{p}{v},$$

такъ что (§ 395)

$$k - c = + t \left(- \frac{R}{v} \right)^2 \frac{v}{p} = R.$$

Отсюда, такъ какъ

$$t \frac{d\varphi}{dt} = c,$$

мы имѣемъ

$$\begin{aligned} d\varphi &= \frac{c}{t} dt + \frac{k - c}{v} dv \\ &= \frac{c}{p} dp + \frac{k}{v} dv \end{aligned}$$

Такимъ образомъ выраженіе

$$p^c v^k = C e^\varphi$$

(гдѣ e —основаніе натуральныхъ логарифмовъ) даетъ для различныхъ опредѣленныхъ значеній φ форму адиабатическихъ линій совершеннаго газа.

397. Лапласъ впервые показалъ, что при прохожденіи звука чрезъ воздухъ сжатія и расширенія послѣдняго совершаются такъ быстро, что температуры не успѣваютъ выравниваться, и измѣненія объема воздуха, слѣдовательно, происходятъ адиабатически.

Поэтому выраженіе для зависимости между давленіемъ и объемомъ воздуха во время прохожденія звука будетъ

$$p v^{\frac{k}{c}} = \text{постоянной},$$

вмѣсто

$$pv = \text{постоянной},$$

т. е. вмѣсто закона Бойля, который былъ взятъ Ньютономъ для рѣшенія этой важной задачи.

Обыкновенный способъ изслѣдованія плоскихъ волнъ (который было бы не мѣсто излагать здѣсь) даетъ для скорости звука, при названныхъ выше соотношеніяхъ между давленіемъ и объемомъ, слѣдующія выраженія:

$$\sqrt{\frac{k}{c} Rt} \text{ (по Лапласу).}$$

$$\sqrt{Rt} \text{ (по Ньютону).}$$

R и t , также какъ скорость звука, могутъ быть прямо измѣрены, и такимъ образомъ изъ формулы Лапласа можетъ быть со значительною точностью определено отношеніе k/c .

Ранкинъ первый сдѣлалъ теоретическое опредѣленіе удѣльныхъ теплотъ воздуха, которое по точности можетъ соперничать съ послѣдующими опытными опредѣленіями Джоуля и Ренъо. Въ своемъ методѣ онъ пользовался этимъ отношеніемъ k къ c въ соединеніи съ величиною разности $k - c$, вычисленной по формулѣ § 395.

398. Для того, чтобы узнать, какъ обыкновенные газы уклоняются отъ совершеннаго газа, употреблялось много методовъ, изъ которыхъ предложенный Томсономъ (какъ усовершенствованіе одного изъ методовъ Джоуля) наиболѣе интересенъ и поучителенъ въ его слѣдствіяхъ. Мы сперва опишемъ уже выше упоминавшійся опытъ

Джоуля въ 1844 году, а затѣмъ разсмотримъ усовершенствованія, сдѣланныя въ немъ Томсономъ.

Температура въ градусахъ С по воздушному термометру, согласно опредѣленію, стоитъ въ такомъ же отношеніи къ 100° , какъ расширеніе воздуха при постоянномъ давленіи [или возрастаніе упругости при постоянномъ объемѣ] отъ точки замерзанія до данной температуры—къ соотвѣтственному расширенію [или возрастанію давленія] отъ точки замерзанія до точки кипѣнія.

399. Своимъ опытомъ, который теперь будетъ описанъ, Джоуль доказалъ со значительною степенью точности, что количество теплоты, развивающееся при сжатіи воздуха, эквивалентно затраченной работѣ.

Это истина, но не такая, которая очевидна сама собою (a truth, but not a truism). Слѣдующія слова Клеркъ-Максвелля, будутъ ли они когда-либо приняты во вниманіе тѣми, для которыхъ они назначались, или нѣтъ, могутъ по крайней мѣрѣ представить весьма полезный урокъ.

«Это отнюдь не есть очевидное само собою предложеніе. Въ самомъ дѣлѣ, оно невѣрно въ случаѣ веществъ, не находящихся въ газообразномъ состояніи, и даже въ случаѣ болѣе несовершенныхъ газовъ оно уклоняется отъ истины. Поэтому способъ вычисленія динамическаго эквивалента теплоты, основанный Майеромъ на этомъ предложеніи тогда, когда вѣрность его еще не была доказана на опытѣ, не можетъ считаться законнымъ»¹⁾.

¹⁾ Гельмгольцъ по этому поводу выражается слѣдующимъ образомъ въ одномъ новомъ примѣчаніи своей книги «Vorträge

400. Джоуль взялъ крѣпкій сосудъ, содержащій сжатый воздухъ, и соединилъ его съ другимъ, равнымъ сосудомъ, изъ котораго воздухъ былъ удаленъ. Каждый изъ сосудовъ былъ погруженъ въ чанъ съ водою. Послѣ того, какъ вода въ чанахъ была тщательно размѣшана, чтобы привести все къ однообразной температурѣ, сразу открывали кранъ трубки, соединяющей оба сосуда. Сжатый воздухъ тотчасъ же съ силою устремлялся въ пустой сосудъ и продолжалъ переходить до тѣхъ поръ, пока давленіе въ обоихъ сосудахъ не сравнивалось; въ результатѣ, какъ и можно было ожидать, температура со-

und Reden:» «Къ весьма различной оцѣнкѣ того, что сдѣлано Р. Майеромъ, приводить давнее противоположеніе умозрѣнія и эмпириі, противоположная оцѣнка дедуктивнаго и индуктивнаго знанія. Не могу умолчать объ этомъ, ибо я самъ часто упоминалъ Майера, указывая на его славу и не дѣлая никакихъ ограниченій: послѣднее при жизни страдальца являлось бы неуиѣстнымъ. Такъ какъ однако его имя и его исторія употребляются для того, чтобы поддерживать научные принципы, которые я считаю совершенно ложными, и которые, къ сожалѣнію, еще не совсѣмъ утратили силу соблазна для образованнаго нѣмецкаго общества, то я долженъ отказаться отъ своей осторожности». . . . Кроме того, Гельмгольцъ показываетъ, что идеи Майера отнюдь не были такъ новы, какъ обыкновенно принимаютъ. «Я долженъ предостеречь отъ несправедливаго преувеличенія, будто бы его мысль была совершенно новымъ взглядомъ безъ какихъ-либо предварительныхъ подготовокъ, исшедшая какъ Минерва изъ головы Зевеса, или нѣкоторою разгадкою, которую достаточно было высказать, чтобы неожиданнымъ образомъ освѣтить темный вопросъ». Такимъ образомъ, идея Майера и не нова, и страдаетъ въ научной точности; издавна скрытыя идеи механической теоріи теплоты были точно выражены и поставлены на истинныя индуктивныя основанія англичаниномъ Джоулемъ, и слава остается за нимъ.

суда, изъ котораго воздухъ изгонялся, вслѣдствіе этого понизилась. Часть его энергіи была затрачена на то, чтобы вогнать воздухъ въ другой сосудъ. Но этотъ воздухъ, стремительно входя въ другой сосудъ, ударялся о его стѣнки, и такимъ образомъ энергія, съ какою воздухъ вгонялся чрезъ кранъ, опять превращалась въ теплоту. Поэтому воздухъ, который вгонялся въ пустоту, становился теплѣе, чѣмъ прежде, а оставшійся въ первомъ сосудѣ охлаждался. Но, размѣшавъ воду вокругъ сосудовъ послѣ того, какъ переходъ воздуха закончился и кранъ былъ закрытъ, Джоуль нашелъ, что число единицъ теплоты, потерянное сосудомъ и водою съ одной стороны, почти точно равнялось числу единицъ теплоты, приобретенному съ другой.

Тогда онъ повторилъ опытъ, взявъ вмѣсто двухъ чановъ съ водою одинъ большій чанъ, также наполненный водою, въ который оба сосуда были погружены рядомъ: давъ части воздуха, какъ прежде, перейти изъ одного сосуда въ другой и размѣшавъ воду, чтобы всѣ части приняли одну общую температуру, Джоуль нашелъ, что произошло лишь едва измѣримое измѣненіе температуры.

Этими опытными методами было безспорно доказано, что количество теплоты, потерянное одною частью воздуха—по крайней мѣрѣ, съ тою точностью, какая допускалась столь грубымъ опытомъ—равняется количеству теплоты, приобретенному другою частью.

401. Сжатый воздухъ обладалъ вначалѣ извѣстною способностью производить работу. Его можно было бы, напримѣръ, употребить на движеніе машины, дѣйствующей сжатымъ воздухомъ. Въ конечномъ состояніи, расширившись до двойного объема, онъ содержалъ уже

меньше полезной рабочей силы въ запасѣ, чѣмъ прежде. Слѣдовательно, произошло разсѣяніе части энергіи, имѣвшейся первоначально; и однако аппаратъ и его содержимое не потеряли нисколько теплоты.

Въ общемъ не было потеряно теплоты, ибо то, что утрачено однимъ сосудомъ, приобрѣтено другимъ. Теплоты не отдано наружнымъ тѣламъ, и не произведено полезной работы. Воздуху просто предоставлено было расширяться—измѣнять свой объемъ—не двигая поршня и не производя ничего такого, что могло бы послужить для передачи работы наружнымъ тѣламъ. Слѣдовательно, воздухъ подъ конецъ содержалъ то-же самое количество энергіи, какъ вначалѣ; но изъ этой энергіи меньшая часть, чѣмъ прежде, представляла полезную энергію. Воздухъ тотчасъ воспользовался представившимся случаемъ, чтобы разсѣять часть своей энергіи, и разсѣять ее столько, сколько позволяли условія даннаго приспособленія.

402. Всего замѣчательнѣе здѣсь то, что для возвращенія воздуху потерянной имъ полезной энергіи—для приведенія воздуха къ первоначальному состоянію, такъ чтобы онъ былъ способенъ произвести столько же работы, какъ прежде—было бы необходимо затратить на него работу, накачивая воздухъ изъ второго сосуда въ первый; но работа, затрачиваемая на это дѣйствіе, пошла бы на нагреваніе всей массы воздуха; и когда будетъ затрачено достаточно работы для того, чтобы перегнать весь воздухъ изъ второго сосуда въ первый, тогда окажется, что количество теплоты, выдѣлившейся въ теченіе процесса—которое можетъ быть измѣрено очень точно—почти совершенно эквивалентно работѣ, израсходованной на обратное переведеніе воздуха.

Итакъ, для возвращенія энергій ея прежней полезности не требуется приложенія энергій, но нѣсколько энергій высшаго рода должно быть понижено. Была затрачена работа, и вмѣсто нея мы получили эквивалентное количество энергій въ менѣе полезной формѣ, въ формѣ теплоты. Мы должны истратить нѣкоторое количество энергій или, лучше, замѣнить ее болѣе низкою формою энергій, чтобы возвратить массѣ воздуха ту степень полезной энергій, которою онъ обладалъ вначалѣ и которую онъ потерялъ при своемъ внезапномъ расширеніи.

403. Томсоново видоизмѣненіе опыта сходно въ нѣкоторыхъ отношеніяхъ съ пріемомъ Ренью, описаннымъ въ § 186. Взятый для опыта газъ пропускается, по возможности равномерно и безшумно, чрезъ трубку, въ которой имѣется препятствіе въ формѣ пористой пробки, напр. шарикъ изъ хлопчатой бумаги или тому подобное. Температура струи тщательно измѣряется по обѣ стороны отъ пробки, и на такомъ разстояніи отъ нея, чтобы можно было избѣжать мѣстныхъ неправильностей, обнаруживающихся вблизи пробки.

Такъ какъ движеніе равномерно, то въ равныя времена чрезъ различныя сѣченія трубки проходятъ равныя массы газа. Пусть давленіе до и послѣ прохожденія чрезъ пробку будутъ p и p' , а соотвѣтствующіе имъ объемы единицы массы— v и v' .

Тогда pv будетъ работа, произведенная надъ единицею массы газа при прохожденіи его чрезъ поперечное сѣченіе прежде достиженія пробки, а $p'v'$ —работа, которую та же масса газа отдаетъ, проходя чрезъ поперечное сѣченіе за пробкою. Разность ихъ есть пріобрѣтенная энергія, въ предположеніи, что не было сообще-

нiя теплоты извнѣ и что не было потеряно энергiи въ формѣ звука. Такъ какъ движенiе принимается за равномерное, то называя E и E' внутреннюю энергiю единицы массы газа до и послѣ прохожденiя чрезъ пробку, мы имѣемъ

$$E' - E = pv - p'v',$$

т. е. условiя опыта таковы, что

$$E + pv$$

есть постоянная величина.

Слѣдовательно (§ 392),

$$t\delta\varphi + v\delta p = 0.$$

или, взявъ p и t за независимыя переменныя,

$$t\frac{d\varphi}{dt}\delta t + t\frac{d\varphi}{dp}\delta p + v\delta p = 0.$$

Здѣсь $t\frac{d\varphi}{dt}$, очевидно, есть удѣльная теплота при постоянномъ давленiи, которую (§ 395) мы называли k . Мы имѣемъ также (§ 393)

$$\frac{d\varphi}{dp} = - \frac{dv}{dt} = - ve,$$

если e есть расширяемость при постоянномъ давленiи. Съ этими величинами наше уравненiе превращается въ

$$k\delta t = -v(1 - et)\delta p \dots (1).$$

Здѣсь t представляетъ абсолютную температуру. Для сравненiя ея со шкалою газоваго термометра, пусть T будетъ температура такого термометра по стоградусному дѣленiю, соотвѣтствующая абсолютной температурѣ t : длины градусовъ обѣихъ шкалъ (абсолютной и стоградуснаго термометра) примемъ равными во всемъ (весьма

маломъ) промежуткѣ температуръ опыта. Тогда по § 124 мы имѣемъ

$$pv = C (1 + \alpha T),$$

приблизительное выраженіе, которое надлежитъ исправить. Такъ какъ градусы обѣихъ шкалъ можно считать равными въ узкихъ предѣлахъ измѣненія, то

$$c = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} = \frac{\alpha}{1 + \alpha T}$$

и, слѣдовательно,

$$\begin{aligned} k \delta t &= -v \left(1 - \frac{\alpha t}{1 + \alpha T} \right) \delta p, \\ &= -C \left(1 - \alpha (t - T) \right) \frac{\delta p}{p} \dots (2) \end{aligned}$$

Такимъ образомъ, окончательно,

$$t = T + \frac{1}{\alpha} + \frac{k \delta t}{R \frac{\delta p}{p}}.$$

Въ опытахъ Джоуля и Томсона измѣненія давленія и температуры были не безконечно малы. Чтобы приложить формулу къ этому случаю, мы имѣемъ полное право интегрировать уравненіе (2), пренебрегая измѣненіемъ $t - T$. Такимъ образомъ, если наблюденное измѣненіе температуры будетъ Θ , а давленія будутъ p и p' , то формула превращается въ

$$t = T + \frac{1}{\alpha} - \frac{k \Theta}{R(\log p - \log p')}.$$

404. Первые два члена этого выраженія даютъ результатъ § 126, вытекающій прямо изъ закона Шарля. Третій членъ, какъ показали опытъ, малъ для тѣхъ при температурахъ, превышающихъ критическую, т. е. для

истинныхъ газовъ, и значительно больше для паровъ. Всѣ истинные газы, кромѣ водорода, были немного холоднѣе послѣ прохожденія чрезъ пробку, чѣмъ до этого; водородъ же немного теплѣе. Помощью этихъ именно опытовъ температура абсолютнаго нуля была найдена (§ 374) весьма близкою къ $-273^{\circ},7$ по стоградусной шкалѣ.

405. Слѣдующая маленькая таблица представляетъ въ главныхъ чертахъ результаты Джоуля и Томсона по отношенію къ воздушному термометру. Числа перваго столбца (по приложеніи къ нимъ $273^{\circ},7$) суть абсолютныя температуры. Числа втораго столбца суть тѣ величины, которыя должно придать къ соотвѣстственнымъ абсолютнымъ температурамъ, чтобы получать температуры по воздушному термометру, если воздухъ удерживается при постоянной плотности, соотвѣтствующей 0°C и 1 атмосферѣ давленія. Третій столбецъ даетъ соотвѣтствующія числа для воздушнаго термометра, если давленіе удерживается постоянно при одной атмосферѣ (*Phil. Trans.* 1854).

Разности между воздушнымъ термометромъ и абсолютною шкалой.

Абсолютная шкала. Постоянный объемъ. Постоянное давленіе.

$273^{\circ},7 + 0$	. . .	$+0$	. . .	$+0$
$+20$	. . .	$+0,0298$	. . .	$+0,0404$
$+40$	. . .	$+0,0403$	. . .	$+0,0477$
$+60$	. . .	$+0,0366$	. . .	$+0,0467$
$+80$	. . .	$+0,0223$	. . .	$+0,0277$
$+100$	. . .	$+0,0000$	. . .	$+0,0000$
$+120$	. . .	$-0,0284$	. . .	$-0,0339$

Абсолютная шкала. Постоянный объемъ. Постоянное давленіе.

+140 . . .	—0,0615 . . .	—0,0721
+160 . . .	—0,0983 . . .	—0,1134
+180 . . .	—0,1382 . . .	—0,1571
+200 . . .	—0,1798 . . .	—0,2018
+220 . . .	—0,2232 . . .	—0,2478
+240 . . .	—0,2663 . . .	—0,2932
+260 . . .	—0,3141 . . .	—0,3420
+280 . . .	—0,3610 . . .	—0,3897
+300 . . .	—0,4085 . . .	—0,4377.

406. При первыхъ своихъ опытахъ надъ опредѣленіемъ динамическаго эквивалента теплоты Джоуль двигалъ пористую пробку или поршень вверхъ и внизъ въ цилиндръ съ водою и измѣрялъ измѣненіе температуры, соответствующее данной разности давленій надъ и подъ пробкой. Уравненіе (1) § 403 даетъ намъ средство произвести вычисленіе. Ибо δt измѣрено; δp извѣстно; v есть объемъ взятой воды, умноженный на число ходовъ поршня впередъ и обратно; остальные величины, e и t , могутъ быть съ достаточною точностью опредѣлены помощью воздушнаго термометра. Въ результатъ получается k въ динамическихъ единицахъ, т. е. прямо значеніе эквивалента Джоуля, потому что значеніе k въ термическихъ единицахъ есть просто единица.

407. Въ §§ 78—81 было сдѣлано первое указаніе на разсѣяніе энергій. Въ тѣсной связи съ этимъ находится вопросъ о *возстановленіи* энергій (*Restoration of energy*), вопросъ, также впервые разобранный В. Томсономъ. Стремленіе теплоты (путемъ проводимости, излученія или переноса) къ выравниванію температуры, т. е. къ потери въ *полезности*, подало первую мысль о

разсѣяніи или пониженіи (деградациі) энергіи. Интересною задачею является поэтому разысканіе того, сколько работы можетъ быть получено помощью совершенной машины изъ данного распредѣленія теплоты.

408. Если мы по-прежнему будемъ измѣрять теплоту динамическими единицами, то динамическое значеніе количества H будетъ просто H , какова бы ни была температура тѣла, содержащаго это количество теплоты. Но наибольшее количество теплоты, превратимое въ работу—если только мы не имѣемъ тѣла при абсолютномъ нулѣ, служащаго холодильникомъ совершенной машины—всегда будетъ меньше H . Если t —абсолютная температура теплаго тѣла, а t_0 —самая низкая температура холодильника, которою мы можемъ пользоваться, то превратимое въ работу количество теплоты есть только (§ 376)

$$\frac{t-t_0}{t} H,$$

или

$$H - t_0 \frac{H}{t}.$$

Положимъ, что мы оперируемъ съ рядомъ тѣлъ при различныхъ температурахъ; нѣкоторыя изъ нихъ употребляются для того, чтобы доставлять теплоту, другія для того, чтобы принимать теплоту; тогда работа будетъ просто

$$\Sigma (H),$$

избытокъ теплоты, взятой отъ однихъ тѣлъ, надъ теплою, отданною другимъ. Этотъ избытокъ всегда долженъ быть—кромѣ случая, когда употребляется совершенная машина—меньше, чѣмъ превратимое въ работу количество

$$\Sigma (H) - t_0 \Sigma \left(\frac{H}{t} \right).$$

Мы видимъ, следовательно, что выраженіе

$$t_0 \Sigma \left(\frac{H}{t} \right)$$

непремѣнно отрицательно; кромѣ того только случая, когда употребляются совершенныя машины: тогда, и только тогда, его значеніе есть нуль. Таково выраженіе, данное Томсономъ для теплоты, разсѣваемой въ теченіе кругового процесса *).

Мы уже показали въ § 379, какъ разбирается вопросъ, если дѣйствія не составляютъ кругового процесса. Выраженіе математическими символами не представляетъ трудности.

409. Когда этотъ способъ изслѣдованія приложенъ къ какому-либо распредѣленію теплоты въ тѣлѣ или системѣ тѣлъ, то онъ приводитъ къ измѣренію полезной энергіи—*Thermodynamic Motivity* системы по В. Томсону. Это есть «та способность, трата которой называется разсѣяніемъ» (the possession, the waste of which is called dissipation).

410. Мы можемъ разсматривать полезную энергію (motivity) извнѣ или изнутри системы.

Въ первомъ случаѣ это будетъ наибольшее количество работы, которое можетъ быть получено изъ системы приведеніемъ температуры всѣхъ ея частей къ нѣкоторой данной температурѣ—положимъ, температурѣ безграничной среды, окружающей систему.

Во второмъ—это будетъ наибольшее количество работы, которое можно получить выравниваніемъ температуръ различныхъ частей системы между собою.

*) См. *Phil. Mag.* May, 1879.

Въ обоихъ случаяхъ выраженіе для величины полезной энергіи имѣетъ видъ

$$\Sigma m \int_{t_0}^t c \frac{t - t_0}{t} dt,$$

гдѣ m есть какой-либо элементъ массы, c —его удѣльная теплота въ динамическихъ единицахъ, t —его абсолютная температура, а t_0 —окончательная температура, къ которой вся система должна быть приведена.

Ибо $mc dt$ есть элементъ теплоты въ тѣлѣ при температурѣ t . Изъ этого часть $mc \frac{t - t_0}{t} dt$ можетъ быть превращена въ работу посредствомъ совершенной машины, которой холодильникъ находится при t_0 . Интегрированіемъ мы суммируемъ всѣ количества теплоты, превращающіяся въ работу при охлажденіи m до t_0 . А знакъ Σ соединяетъ вмѣстѣ всѣ эти количества для отдѣльныхъ массъ системы.

Когда система разсматривается извнѣ, то t_0 дано, и значеніе приведеннаго выраженія прямо можетъ быть вычислено.

Когда же система разсматривается въ самой себѣ, t_0 должно быть опредѣлено изъ того условія, что если новое тѣло при этой температурѣ взято какъ холодильникъ машинъ, берущихъ теплоту отъ болѣе теплыхъ частей системы, и какъ источникъ теплоты, по отношенію къ которому болѣе холодныя части системы являлись бы холодильниками — то система въ общемъ не приобрѣла и не потеряла бы теплоты. Это условіе выражается чрезъ

$$\Sigma m \int_{t_0}^t c \frac{t}{t} dt = 0.$$

[Ибо если температура t одной изъ массъ выше, чѣмъ t_0 , то количество теплоты H , исходящее отъ этой массы, *отдаетъ* часть $\frac{t_0}{t} \frac{H}{t}$ тѣлу при t_0 . Если же t ниже, чѣмъ t_0 , то сообщеніе H массѣ при t обусловливаетъ *заимствование* $\frac{t_0}{t} \frac{H}{t}$ отъ тѣла при t_0 . Форма выраженія, слѣдовательно, одна и та же въ обоихъ случаяхъ; и различіе между отдачей и принятіемъ указывается порядкомъ предѣловъ интеграла: интегралъ берется отъ болѣе низкой до болѣе высокой температуры въ первомъ случаѣ и отъ болѣе высокой до болѣе низкой во второмъ.]

Отсюда t_0 можетъ быть вычислено, и выраженіе для полезной энергіи принимаетъ тогда очень простую форму

$$\Sigma m \int_{t_0}^t c dt.$$

411. Весьма любопытное слѣдствіе отсюда есть то, что если система состоитъ изъ двухъ равныхъ массъ m одного и того же вещества при температурахъ t_1 и t_2 , и если мы примемъ, что удѣльная теплота не зависитъ отъ температуры, то общая температура послѣ того, какъ вся внутренняя полезная энергія истощена, будетъ

$$\sqrt{t_1 t_2},$$

а полезная энергія

$$m c (\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}).$$

Такимъ образомъ внутренняя полезная энергія системы, состоящей изъ фунта воды при 0°C и фунта кипящей воды, въ футофунтахъ есть

$$1390 (19,339 - 16,553)^2 = 1390 \times 7,76.$$

Абсолютная температура, къ которой система приводится, когда ея внутренняя полезная энергія исчерпана, есть

320,12, что отвѣчаетъ $46^{\circ},12$ С.

Если-бы объ части системы были просто смѣшаны, то окончательная температура была-бы 324, или 50° С. Слѣдовательно, энергія была-бы больше на энергію, соотвѣтствующую нагреванію 2 фунтовъ воды на $3^{\circ},88$, т. е. больше на количество работы $1390 \times 7,76$ полученное въ первомъ процессѣ. Но только часть этого избытка представляетъ полезную энергію. Съ неограниченною внѣшнею системою при температурѣ $46^{\circ},12$ С мы можемъ превратить въ работу только около

$1390 \times 0,048$ футофунтовъ.

Такимъ образомъ, если въ обоихъ случаяхъ вода приводится къ однообразной температурѣ $46^{\circ},12$ С., то мы получаемъ въ 160 разъ большее количество работы посредствомъ перваго процесса, чѣмъ посредствомъ второго.

412. Энтропія системы измѣняется вмѣстѣ съ ея полезною энергіей; но оба понятія совершенно различны, какъ показываетъ слѣдующій простой случай.

Если элементъ H теплоты содержится въ тѣлѣ при температурѣ t_1 , то его полезная энергія (какъ мы видѣли) есть

$$\frac{t_1 - t_0}{t_1} H,$$

гдѣ t_0 есть низшая температура, которой мы можемъ пользоваться. Поэтому, если эта теплота будетъ передана другому тѣлу при болѣе низкой температурѣ t_2 , то потеря въ полезной энергіи будетъ

$$\left(\frac{t_1 - t_0}{t_1} - \frac{t_2 - t_0}{t_2} \right) H = t_0 \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) H.$$

Съ другой стороны, если элементъ H теплоты переходитъ отъ тѣла при температурѣ t_1 къ другому при температурѣ t_2 , то первое тѣло теряетъ въ энтропін количество $\frac{H}{t_1}$, а второе приобретаетъ $\frac{H}{t_2}$ (§ 378), такъ, что полная энтропія системы *возрастаетъ* на величину

$$\left(-\frac{1}{t_2} - -\frac{1}{t_1} \right) H.$$

Такимъ образомъ, *потери* въ полезной энергіи идетъ одновременно съ *приобрѣтеніемъ* въ энтропін. Но потеря въ полезной энергіи вслѣдствіе перехода теплоты отъ болѣе теплаго тѣла къ болѣе холодному тѣмъ меньше, чѣмъ ниже температура, которой мы можемъ пользоваться; тогда какъ соотвѣтственное *приобрѣтеніе* въ энтропін одинаково, какова ни была эта нижайшая температура.

413. Граница температуры вліяетъ на энтропію только въ томъ отношеніи, что ограничиваетъ ея окончательную величину. Но еслибы внѣшняя вселенная была при температурѣ абсолютнаго нуля, то (теоретически) не могло бы быть *потери* въ полезной энергіи, т. е. разсѣянія тепловой энергіи; тогда какъ энтропія *возрастала* бы безгранично по мѣрѣ того, какъ теплота постепенно переходила бы на болѣе холодныя тѣла.

Мы видимъ такимъ образомъ, что теорема Клаузіуса: «*Энтропія вселенной стремится къ максимуму*» — отнюдь не тождественна, хотя и тѣсно связана съ опубликованной раньше «теоріей разсѣянія» Томсона.

414. Въ § 195 мы обѣщали изложить Томсоново изслѣдованіе явленій въ термоэлектрической цѣпи. Те-

перь мы можем это сдѣлать при помощи формулъ настоящей главы.

— Пусть t_0 и t будутъ абсолютныя температуры спаевъ въ цѣпи изъ двухъ металловъ, для которыхъ удѣльная теплота электричества имѣетъ соотвѣтственно значенія σ_1 и σ_2 . Пусть T будетъ температура нейтральной точки, а Π —явленіе Пельтье, когда единица тока проходитъ чрезъ спай при температурѣ t . Тогда измѣненіе электродвигательной силы E , причиняемое повышеніемъ температуры теплаго спая отъ t до $t + \delta t$, будетъ

$$\delta E = \frac{d\Pi}{dt} \delta t + (\sigma_1 - \sigma_2) \delta t,$$

но слѣдуетъ припомнить, что направленіе отъ теплаго къ холодному необходимо обращается при переходѣ отъ одного изъ двухъ металловъ къ другому.

Но дифференцированіе выраженія

$$\Sigma \left(\frac{H}{t} \right),$$

которое (§ 408) всегда равно нулю для ряда обратимыхъ дѣйствій—а таковы именно (§ 195), по предположенію, разсматриваемыя здѣсь дѣйствія—дастъ

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{\Pi}{t} \right) \delta t + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t} \delta t = 0.$$

Не дѣлая никакихъ предположеній относительно выраженія $\sigma_1 - \sigma_2$, мы можемъ исключить его изъ этихъ уравненій и получаемъ весьма замѣчательный результатъ:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\Pi}{t}.$$

[Отсюда мы прямо видимъ, что Π уничтожается при

нейтральной точкѣ, ибо тогда (§ 193) значеніе E есть максимум и, слѣдовательно,

$$\frac{dE}{dt} = 0.]$$

Это уравненіе показываетъ, что значеніе Π можетъ быть вполне опредѣлено измѣреніями зависимости силы тока отъ температуры нагрѣтаго спая при постоянной температурѣ холоднаго спая. Наоборотъ, сравненіе наблюденныхъ токовъ съ результатами соответственныхъ измѣреній явленія Пельтье дало бы намъ возможность провѣрить сдѣланныя нами допущенія.

415. До сихъ поръ мы слѣдовали Томсону. Если же теперь мы примемъ во вниманіе тотъ опытный результатъ (§ 197), что удѣльная теплота электричества пропорціональна абсолютной температурѣ, то мы имѣемъ

$$\sigma_1 = k_1 t, \quad \sigma_2 = k_2 t,$$

и наши уравненія превращаются въ

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d\Pi}{dt} + (k_1 - k_2) t,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\Pi}{t} \right) + (k_1 - k_2) = 0.$$

Второе ур. даетъ

$$\begin{aligned} \frac{\Pi}{t} &= C - (k_1 - k_2)t \\ &= (k_1 - k_2) (T - t), \end{aligned}$$

ибо Π уничтожается при нейтральной температурѣ.

Затѣмъ изъ перваго ур. мы находимъ окончательно

$$E = (k_1 - k_2) (t - t_0) \left(T - \frac{t + t_0}{2} \right).$$

Такимъ образомъ мы видимъ, что въ выраженіе для электродвигательной силы входятъ только два переменныхъ множителя; изъ нихъ, конечно, первый былъ извѣстенъ Зеебеку, второй же открытъ путемъ опыта Томсономъ.

Постоянный множитель (k_1 — k_2) одинъ и тотъ же какъ въ выраженіи для э. д. с., такъ и въ выраженіи для явленія Пельтье. Поэтому, измѣряя ту или другую изъ этихъ величинъ, мы можемъ опредѣлить только алгебраическую разность между удѣльными теплотами электричества въ обоихъ металлахъ.

Дѣйствительная величина Томсоновскаго явленія въ какомъ-нибудь металлѣ, слѣдовательно, должна быть измѣрена непосредственно.

Впрочемъ, всѣ результаты этого § очень легко получаются при простомъ разсматриваніи диаграммы (§ 196).

416. *Содержаніе §§ 383 — 415.* Состояніе единицы массы работающаго вещества можетъ быть выражено въ функціи какихъ-либо двухъ изъ пяти величинъ: энергіи, объема, давленія, температуры и энтропіи. Отсюда различныя термодинамическія соотношенія между ними. Соотношеніе между удѣльными теплотами. Развитіе теплоты вслѣдствіе сжатія. Опредѣленіе абсолютной температуры въ градусахъ воздушнаго термометра. Возстановленіе энергіи. Полезная энергія (thermodynamic motivity). Сравненіе съ энтропией. Теорія термоэлектрической цѣпи.

ГЛАВА XXII.

Природа теплоты.

417. Каждый слышалъ знаменитую фразу: *Ohne Phosphor kein Gedanke*—«безъ фосфора нѣтъ мысли». Какъ бы тамъ ни было относительно истины этого положенія, мы же на основаніи фактовъ, изложенныхъ въ предшествовавшихъ главахъ, можемъ утверждать, что *безъ движенія нѣтъ теплоты*. Но какъ первое положеніе, будь оно даже безусловно истинно, не даетъ намъ права сказать, что «мысль есть фосфоръ», такъ точно изъ втораго отнюдь не слѣдуетъ, что «теплота есть движеніе». Поэтому очень жаль, что нѣкоторые изъ величайшихъ современныхъ авторитетовъ въ этомъ дѣлѣ, какъ Максвеллъ и В. Томсонъ, иногда употребляли эту фразу въ той формѣ, въ которой она первоначально употреблялась Румфордомъ и Дэви прежде, чѣмъ были выработаны ясныя понятія объ энергіи, и что они такимъ образомъ ненамѣренно поддерживали обыкновеніе, совершенно несомѣстное какъ съ ихъ обычнымъ способомъ выражаться, такъ и съ ихъ знаніемъ истинной природы теплоты. Ибо въ своихъ положеніяхъ, выраженныхъ менѣе неосторож-

но, эти ученые неизмѣнно говорятъ о теплотѣ, какъ объ энергіи.—Слово *движеніе* употребляется въ двухъ различныхъ значеніяхъ: одно, обыденное и научное въ то же время, относится только до измѣненія положенія; другое, чисто научное, подразумѣваетъ (по Ньютону) количество движенія (*momentum*). По отношенію къ теплотѣ слово, конечно, понимается въ первомъ его значеніи, ибо употребленіе его во второмъ было бы не только неловко, но прямо невѣрно. Изъ посмертныхъ манускриптовъ Сади Карно, опубликованныхъ впервые въ 1878 г., мы видимъ, что онъ очень осторожно выражается объ этомъ предметѣ. Такъ, онъ говоритъ: *Un mouvement (celui de la chaleur rayonnante) pourrait-il produire un corps (le calorique)? Non, sans doute, il ne peut produire qu'un mouvement. La chaleur est donc le résultat d'un mouvement.* Alors il est tout simple qu'elle puisse se produire par la consommation de puissance motrice, et qu'elle peut produire cette puissance ¹⁾. [Это одно изъ самыхъ поразительныхъ мѣстъ въ сочиненіи, о которомъ мы упоминали выше, въ § 84].

418. Теплоту, какъ всѣ другія формы энергіи, мы познаемъ только въ ея превращеніяхъ или ея передачѣ. Мы не можемъ индивидуализировать какую-либо часть ея такъ, чтобы потомъ узнать ее снова — какъ не можемъ отличить въ сосудѣ съ водою тѣ части содержамаго, которыя влиты прежде, отъ тѣхъ, которыя при-

¹⁾ «Можетъ ли движеніе (движеніе лучистой теплоты) произвести тѣло (теплородъ)? Конечно, нѣтъ; оно можетъ произвести только движеніе. Следовательно, теплота есть результатъ движенія. Тогда вполнѣ понятно, что она можетъ производиться затратою движущей силы и сама производить эту силу». *Р. перев.*

бавлены послѣ. Мы можемъ сказать (§ 220), сколько теплоты поступаетъ въ тѣло и сколько покидаетъ его: но совсѣмъ иной вопросъ, что такое теплота *въ самомъ тѣлѣ*. Что по крайней мѣрѣ часть ея имѣетъ форму кинетической энергій, это мы знаемъ по лучеиспусканію. Ибо мы видѣли, что всѣ тѣла испускаютъ лучи, т. е. сообщаютъ энергію колебательнаго движенія свѣтоносной средѣ. Это можетъ быть только слѣдствіемъ движеній частицъ тѣла, потому что въ цѣломъ тѣло не движется. И мы видѣли, что излученіе не ограничивается только поверхностью тѣла. Поэтому всѣ частицы (подъ которыми мы въ данное время разумѣемъ буквально «малыя части», части настолько малыя, что онѣ не могутъ быть различаемы помощью микроскопа) нагрѣтаго тѣла должны быть въ движеніи. Но эти частицы могутъ имѣть движеніе двухъ совершенно разныхъ родовъ: движеніе каждой частицы, *какъ мысля*, по отношенію къ другимъ, и движеніе отдѣльныхъ частей частицы по отношенію къ ея центру инерціи. Это замѣчаніе, какъ увидимъ позже, приводитъ къ нѣкоторымъ очень важнымъ слѣдствіямъ.

419. Какую долю энергій въ тѣлѣ составляетъ энергія невидимаго движенія его малыхъ частей—это для большинства тѣлъ вопросъ еще очень темный.

Прежде, чѣмъ входить въ разборъ даннаго предмета, необходимо вкратцѣ рассмотреть, что намъ извѣстно о конечномъ строеніи матеріи. Это, разумѣется, поведетъ къ значительному отклоненію въ сторону.

420. Что даже однородная съ виду жидкая или твердая матерія, какъ масса воды, стекла или золота, хотя она и сохраняетъ свою видимую однородность подѣлами сильными нашими микроскопами, имѣетъ въ концѣ

концовъ извѣстное *зернистое* строеніе, извѣстную неоднородность—это удостовѣрено многими весьма разнообразными фактами. Напримѣръ, такъ какъ вода тѣло сложное, то совершенно ясно, что дѣленіе капли ея, даже мысленно, не можетъ быть продолжаемо далѣе извѣстнаго предѣла, если части должны еще оставаться *водою*. Это—надо замѣтить—совершенно не зависить отъ вопроса объ *атомахъ* и о безграничной дѣлимости матеріи. Единственный способъ обойти это заключеніе состоялъ бы въ признаніи невѣрнымъ ученія о *непроницаемости*, т. е. въ допущеніи, что одна и та же (неопредѣленно малая) часть пространства можетъ быть одновременно занимаема водородомъ и кислородомъ. Но такой способъ аргументаціи слишкомъ метафизиченъ. чтобы его можно было принять въ физикѣ.

421. Къ счастью, мы можемъ разрѣшить дѣло другими путями. Неоднородность конечнаго строенія матеріи *доказана*: 1) различіемъ въ показателяхъ преломленія каждаго вещества для свѣта различной длины волны; 2) явленіями электричества отъ соприкосновенія; 3) свойствами жидкихъ пленокъ, какъ напр. въ *мыльномъ пузырьѣ*; и 4) свойствами газовъ ¹⁾. Мы ограничимся только послѣднимъ пунктомъ, такъ какъ онъ тѣснѣе другихъ связанъ съ нашимъ предметомъ. Мы приведемъ результаты кинетической теоріи и сравнимъ ихъ, одинъ за другимъ, съ извѣстными свойствами газовъ.

422. Атомистическія умозрѣнія древнегреческихъ фи-

¹⁾ См. *Обзоръ некоторыхъ новѣйшихъ успѣховъ физическихъ знаний* Тэта, перев. подъ ред. И. М. Сѣченова, Спб. 1877 г., лекціи XII и XIII.

Зам. р. перев.

лософовъ, изложенныя такъ ясно Лукреціемъ, всегда болѣе или менѣе вліяли на мысль новѣйшихъ временъ и, вѣроятно, отчасти внушили Д. Бернулли (§ 39) его понятіе о причинѣ давленія газа. Это понятіе возстановлено было Лесажемъ и Превё, а затѣмъ въ Англіи Гералатомъ въ очень любовитномъ сочиненіи; но первыя основанныя на немъ точныя вычисленія сдѣланы Джоулемъ. Онъ показалъ, что если давленіе массы водорода обусловливается постоянными ударами его частицъ въ стѣнки сосуда, то скорость частицъ (предполагая ее одинаковою для всѣхъ) должна быть около 6055 футовъ въ секунду при 0° С и 1 атмосферѣ давленія. И также, что при постоянномъ объемѣ скорость возрастаетъ прямо пропорціонально квадратному корню изъ давленія. Эти вычисленія были крайне просты, такъ какъ въ нихъ не принимались во вниманіе ни число, ни величина частицъ, ни ихъ взаимныя столкновенія. [Сдѣланныя съ тѣхъ поръ болѣе полныя изслѣдованія показали, что результатъ Джоуля будетъ вѣренъ, если вмѣсто принимаемой однообразной скорости частицъ мы возьмемъ (такъ - называемую) *среднюю квадратичную скорость*].

423. Легко видѣть, какимъ образомъ можно прійти къ закону Бойля при помощи этой элементарной гипотезы. Въ самомъ дѣлѣ, положимъ, что газъ заключенъ въ цилиндрѣ, и что мы могли бы, *не измѣняя общей скорости частицъ газа*, сжать его до половиннаго объема вдавливаніемъ внутрь одного изъ основаній цилиндра. Тогда число толчковъ въ секунду въ основаніе цилиндра было бы удвоено, потому что длина пути частицъ отъ одного основанія до другого сдѣлалась вдвое меньше, а скорость частицъ осталась та же. Число и сила толч-

ковъ въ кривую поверхность цилиндра останутся такими же, какъ прежде, но дѣйствіе частицъ распределяется теперь на вдвое меньшую поверхность. Такимъ образомъ давленіе вездѣ удвоится.

Упомянутое выше вычисленіе Джоуля можетъ быть произведено слѣдующимъ образомъ. Пусть M будетъ масса газа, заключеннаго въ кубѣ, котораго сторона есть l , v — скорость частицы, n — число частицъ. Если мы предположимъ, что одна треть ихъ движется перпендикулярно къ каждой парѣ граней, то число ударовъ каждой частицы въ секунду въ каждую изъ граней будетъ $\frac{v}{2l}$, а все число ударовъ въ секунду въ одну грань $\frac{nv}{6l}$. При каждомъ ударѣ скорость массы $\frac{M}{n}$ получаетъ обратное направленіе; слѣдовательно, мѣра силы удара будетъ $\frac{2Mv}{n}$. Давленіе же на единицу поверхности грани найдется умноженіемъ силы каждого удара на ихъ число и раздѣленіемъ на площадь грани. Оно, слѣдовательно, есть $\frac{Mv^2}{3l^2}$, т. е. равно трети произведенія изъ плотности газа на квадратъ скорости его частицъ.

424. Простое распространеніе показываетъ, какъ можно опредѣлить удѣльные теплоты газовъ, если мы предположимъ, что полная кинетическая энергія частицъ повышается отъ энергій сообщаемой теплоты. Но здѣсь Клаузіусъ нашелъ нужнымъ принять въ расчетъ и внутреннюю энергію каждой частицы. Если мы предположимъ, что эта послѣдняя въ среднемъ находится въ постоянномъ отношеніи къ энергій поступательнаго движенія частицы, то окажется, что опытные факты могутъ быть при этомъ объяснены.

425. Слова, напечатанныя курсивомъ въ началѣ § 423, заслуживаютъ особаго замѣчанія, и мы къ нимъ возвращаемся. При вдвиганіи поршня производится работа противъ давленія газа, и мы знаемъ, что въ результатѣ газъ нагрѣвается, и что (§ 365) его давленіе возрастаетъ адиабатически, т. е. быстрѣе, нежели слѣдуетъ по закону Бойля. Для предотвращенія этого теплота, обусловливаемая сжатіемъ, должна быть удаляема по мѣрѣ ея образованія. Такимъ образомъ расходуется работа, а эквивалентное ей количество теплоты сообщается окружающимъ тѣламъ. Другими словами, происходитъ разсѣяніе энергіи. Но если бы напечатанное курсивомъ могло быть выполнено на дѣлѣ, то произошло бы возстановленіе энергіи безъ какой-либо затраты работы. Ибо полезная энергія въ сжатомъ газѣ была бы повышена безъ какого-либо расходованія работы; хотя энергія движенія его частицъ осталась бы неизмѣненною.

426. Первою попыткойъ надлежащей разработки вопроса мы обязаны Клаузіусу. Онъ первый принялъ въ расчетъ столкновенія частицъ другъ съ другомъ и показалъ, что эти столкновенія не измѣняютъ прежде полученныхъ результатовъ. Большая заслуга его состоитъ также въ томъ, что онъ первый ввелъ статистическій методъ теоріи вѣроятностей и такимъ образомъ далъ намъ, по крайней мѣрѣ, приблизительное понятіе о вѣроятной длинѣ *средняго свободного пути*, т. е. средняго разстоянія, проходимаго частицею до того момента, когда она столкнется съ другою, и когда такимъ образомъ путь ея измѣнится. Отсюда онъ объяснилъ также медленность диффузіи газовъ и ихъ ничтожную теплопроводимость. Вскорѣ послѣ того Клеркъ - Максвеллъ усовершенствовалъ теорію, принявъ въ разсмотрѣніе,

также со статистической точки зрѣнія, различіе въ скоростяхъ, съ которыми движутся разныя частицы; Клаузіусъ же именно ограничилъ свои изслѣдованія предположеніемъ для простоты, что всѣ частицы движутся съ одинаковою скоростью. Максвеллъ объяснилъ внутреннее треніе газовъ и опредѣлить болѣе точно длину средняго свободнаго пути.

Эти изслѣдователи, при искусномъ содѣйствіи Больцмана и другихъ, съ тѣхъ поръ еще далѣе расширили теорію. Здѣсь мы можемъ лишь дать общій отчетъ о наиболѣе выдающихся изъ добытыхъ ими результатахъ. Мы сдѣлаемъ это, по возможности, такъ, чтобы было видно, въ какой мѣрѣ теорія способна объяснить извѣстные факты; ибо это, и только это, даетъ возможность судить о прочности и пригодности теоріи. Нашъ планъ исключаетъ введеніе болѣе сложныхъ математическихъ дѣйствій, такъ что мы можемъ привести лишь исходныя предположенія съ ихъ главными теоретическими слѣдствіями.

427. Въ предположеніи, что газообразное содержимое сосуда состоитъ изъ свободныхъ частицъ, которыя дѣйствуютъ другъ на друга съ извѣстными силами, а среднее распредѣленіе частицъ подвержено только легкимъ и быстрымъ періодическимъ измѣненіямъ, Клаузіусъ установилъ совершенно общую теорему, которая символически выражается такъ:

$$\frac{1}{2} \sum (mv^2) = \frac{3}{2} pV + \frac{1}{2} \sum (Rr).$$

Здѣсь лѣвая часть представляетъ полную кинетическую энергію системы: полусумму произведеній каждой изъ массъ m на квадратъ ея скорости v . Если отдѣльныя частицы движутся по отношенію къ центру

инерции всей частицы, то сюда должна быть включена и энергия этого движения. Правая часть состоитъ изъ двухъ членовъ; изъ нихъ первый есть лишь числовое кратное отъ произведенія объема на давленіе, испытываемое стѣнками сосуда (давленіе предполагается равномернымъ). Второй членъ, который Клаузиусъ называлъ *virialомъ*, зависитъ отъ взаимнаго дѣйствія между каждымъ двумя частицами (которое предполагается направленнымъ вдоль прямой линіи, соединяющей частицы). Каждый изъ элементовъ этого члена есть произведеніе силы взаимнаго дѣйствія R (положительной въ случаѣ притяженія) на разстояніе r между двумя частицами. Въ этотъ членъ должна быть включена та доля его, которая зависитъ отъ измѣненія разстоянія между частями одной и той же частицы.

Если нѣтъ дѣйствія между частицами или частями одной и той же частицы (кромѣ столкновеній, въ какомъ случаѣ R конечная величина и практически $r=0$), то мы имѣемъ

$$\frac{1}{2} \sum (mv^2) = \frac{3}{2} pV.$$

Если кинетическая энергия постоянна, т. е. если температура не измѣняется, то мы получаемъ законъ Бойля. При измѣненіи же температуры всѣ газы, какъ мы видимъ, расширяются одинаково—а это есть законъ Шарля (§ 124). Такимъ образомъ, кинетическая энергия совершеннаго газа пропорціональна его абсолютной температурѣ.

Мы видимъ также, что отклоненіе сгущающихся газовъ отъ законовъ Бойля и Шарля должно быть отнесено на счетъ притяженія между частицами, пока объемъ газа (при постоянной температурѣ) уменьшается бы-

стрѣе, чѣмъ возрастаетъ давленіе. Но если объемъ уменьшается медленно, чѣмъ возрастаетъ давленіе, то между частицами должно быть отталкиваніе—иначе наше предположеніе, что $r = 0$ при ударѣ, было бы невѣрно.

Оба эти случая хорошо видны на свойствахъ угольнаго ангидрида при температурахъ выше критической точки (§ 360): отъ низкихъ до среднихъ давленій имѣетъ мѣсто притяженіе, при высшихъ—отталкиваніе.

428. Клеркъ-Максвелль показали, что если имѣется смѣсь частицъ двухъ родовъ, то онѣ будутъ обмѣниваться энергіей до тѣхъ поръ, пока средняя кинетическая энергія не сдѣлается одинаковою для обоого рода частицъ. Отсюда слѣдуетъ, что когда массы различныхъ газовъ имѣютъ одинаковую температуру и одинаковое давленіе, то *число частицъ въ единицѣ объема каждаго газа одно и то же*. Это есть то, что химики называютъ закономъ Авогадро (онъ указанъ также Амперомъ въ 1814 г.).

429. Клеркъ-Максвелль показали также, что въ смѣси газовъ, находящихся въ гидростатическомъ равновѣсіи подъ дѣйствіемъ тяжести, каждый газъ дѣйствуетъ такъ, какъ бы другихъ не было. И далѣе, что при равновѣсіи, подъ вліяніемъ только тяжести, распространеніе теплоты проводимостью привело бы къ равномерной температурѣ во всей массѣ столба газа. [Отсюда, посредствомъ простаго приложенія процесса Карно, можно показать, что тяжесть не можетъ имѣть вліянія на тепловое равновѣсіе какого бы то ни было вещества].

430. Одно замѣчательное соотношеніе, выведенное изъ кинетической теоріи газовъ, позволяетъ намъ судить приблизительно о длинѣ средняго свободного пути частицъ газа. Показано именно, что эта длина отно-

сится къ діаметру частицы газа такъ, какъ объемъ газа относится къ увеличенному въ $8\frac{1}{2}$ разъ полному объему частицъ. Если допустить, что частицы тѣла въ жидкомъ состояніи почти прикасаются между собою, то можно приблизительно найти величину частицы изъ относительныхъ плотностей газа и жидкости. Такимъ образомъ найдено, что въ кубическомъ дюймѣ газа при обыкновенной температурѣ и обыкновенномъ давленіи содержится около 3×10^{20} частицъ; длина средняго свободнаго пути для кислорода составляетъ около $\frac{1}{450000}$ дюйма, а средняя квадратичная скорость около 1550 футовъ въ секунду. Слѣдовательно, каждая частица въ среднемъ сталкивается съ другими около 7600 милліоновъ разъ въ секунду.

431. Теперь мы поймемъ, почему кислородъ и азотъ нашей атмосферы повсемѣстно смѣшаны такъ, что всѣ анализы различныхъ порцій данной массы воздуха приводятъ въ точности къ одному и тому же отношенію кислорода и азота. Если бы каждый кубическій дюймъ содержалъ только дюжину или двѣ частицы, то, какъ показываетъ теорія вѣроятностей, въ большомъ пространствѣ воздуха были бы въ каждое мгновеніе извѣстные кубическіе дюймы, въ которыхъ отношеніе составныхъ частей могло бы быть какое угодно. Но и тогда данное положеніе вещей могло бы длиться лишь чрезвычайно малую долю секунды. При огромномъ же числѣ частицъ въ каждомъ кубическомъ дюймѣ, вѣроятность того, чтобы даже одинъ кубическій дюймъ нижняго слоя атмосферы (хотя бы на одно мгновеніе) былъ наполненъ только кислородомъ или только азотомъ, практически сводится къ исчезающей величинѣ. Однако, про-

странства меньшія одной триліонной кубическаго дюйма могутъ случайно (но лишь менѣе, чѣмъ на билліонную долю секунды) содержать однѣ кислородныя или однѣ азотныя частицы. [Эти числа намѣренно даны въ самыхъ грубыхъ чертахъ; но они доставляютъ все, что намъ нужно: понятіе объ относительныхъ величинахъ, съ какими здѣсь приходится имѣть дѣло].

432. Слѣдующій опытъ Грэма есть одинъ изъ самыхъ прекрасныхъ и поучительныхъ опытовъ всей физической науки; между тѣмъ онъ не требуетъ для успѣшнаго выполненія никакихъ особенныхъ хлопотъ.

Возьмемъ пустой внутри шарообразный сосудъ изъ неглазурованной глины и вмажемъ въ его горлышко стеклянную трубку умѣреннаго внутренняго діаметра, такъ что получится нѣчто похожее на большой термометръ. Опрокинемъ наполненный воздухомъ приборъ и погрузимъ открытый конецъ трубки въ воду. Разность уровней воды внутри и внѣ трубки чрезъ короткое время приходитъ къ той, которая соответствуетъ капиллярнымъ силамъ, и остается затѣмъ на этой величинѣ. [Если бы сосудъ былъ изъ глазурованной глины или изъ стекла, то вода внутри поднялась бы не столь высоко; и, погружая трубку глубже, мы постоянно получали бы пониженіе уровня внутренней поверхности]. Такое состояніе поддерживается совершеннымъ равенствомъ числа частицъ, постоянно проходящихъ въ томъ и другомъ направленіи чрезъ тонкія скважины глиняныхъ стѣнокъ сосуда. Къ сожалѣнію, мы не можемъ замѣтить частицъ и такимъ образомъ непосредственно видѣть, какъ содержимое аппарата постоянно мѣняется. Мы должны поступить иначе. Если бы мы могли сдѣлать такъ, чтобы внутрь входило больше частицъ, чѣмъ ихъ выходитъ на-

ружу, то газъ началъ бы выходить пузырями изъ конца трубки; если же число входящихъ частицъ будетъ меньше, нежели выходящихъ, то атмосферное давленіе заставитъ воду подняться въ трубкѣ. Именно это происходитъ, если глиняный сосудъ окружить атмосферою свѣтильнаго газа (собранныго въ опрокинутый стаканъ). Какъ только это сдѣлано, пузыри воздуха быстро начинаютъ выходить изъ трубки. Спустя нѣкоторое время, когда содержимое глиняного сосуда будетъ главнымъ образомъ состоять изъ свѣтильнаго газа, удалимъ стаканъ: вода быстро подымется въ трубкѣ. То и другое показываетъ намъ, насколько быстрѣе свѣтильный газъ проходитъ чрезъ скважины, чѣмъ воздухъ.

Быстрота прохожденія различныхъ газовъ при одинаковыхъ условіяхъ обратно пропорціональна квадратнымъ корнямъ изъ ихъ плотностей.

Описывая этотъ опытъ, мы имѣли главнымъ образомъ въ виду показать, до какой степени независимы другъ отъ друга частицы газа, и какъ быстро онѣ должны двигаться, даже при обыкновенной температурѣ, а тѣмъ самымъ—дать дополнительный и весьма сильный доводъ въ пользу кинетической теоріи.

Здѣсь же мы попутно имѣемъ впервые способъ доказать равенство различныхъ частицъ какого-либо газа. Ибо газъ, состоящій изъ частицъ различной величины, могъ бы быть частью «просѣянъ», если дать половинѣ его диффундировать чрезъ глиняный сосудъ. Половинѣ оставшагося газа можно дать снова диффундировать и т. д. Ясно, что мы такимъ образомъ имѣли бы процессъ, сходный съ тѣмъ, который химики называютъ *отимучиваніемъ*, и, повторяя его достаточное число разъ, мы могли бы получить два образца одного и того же

газа различныхъ плотностей (при одинаковыхъ температурахъ и давленіи).

433. Другіе, столь же сильные доводы въ пользу теоріи доставляются диффузіей одного газа въ другой безъ посредства пористой перегородки, какъ въ описанномъ выше опытѣ. Общіе законы этой диффузіи оказываются въ точности такими, какими ихъ даетъ теорія; и тщательныя измѣренія Лошмидта позволили намъ составить себѣ болѣе опредѣленные понятія о дѣйствительной величинѣ и числѣ частицъ въ различныхъ газахъ, чѣмъ то можно было получить на основаніи грубыхъ предположеній, указанныхъ выше, въ § 430. Слѣдующія приблизительныя числа взяты изъ «Bradford Lecture on *Molecules*» Максвелля (1873):

	Водородъ.	Кислородъ.	Оксъ углерода.	Углекислый ангидридъ.
Средн. квадратичная скорость при 0°	6190	1550	1656	1320
Средній путь	386	224	193	151
Столкновенія	17750	7646	9489	9720
Діаметръ	2,3	3	3,5	3,7

Число столкновеній дано здѣсь (какъ въ § 430) въ милліонахъ въ секунду; длина средняго пути и діаметръ—въ стомилліонныхъ доляхъ дюйма, а скорость—въ футахъ въ секунду.

434. Дальнѣйшее подтвержденіе теоріи мы имѣемъ въ удовлетворительномъ объясненіи, даваемомъ ею факту, который безъ того являлся бы очень страннымъ, а именно вязкости газовъ. Легко видѣть, что послѣдняя должна быть слѣдствіемъ внутренней диффузіи между слоями газа, движущимися съ различными скоростями и такимъ образомъ какъ бы скользящими одинъ по дру-

тому. Ибо этотъ процессъ стремится уничтожить относительныя скорости обонхъ слоевъ и производить, следовательно, дѣйствіе того же точно рода, какъ обыкновенное треніе между твердыми тѣлами.

435. Теплопроводимость газа, очевидно, должна быть объясняема передачею энергіи вслѣдствіе столкновеній болѣе быстро движущихся частицъ съ другими частицами. Кинетическая теорія даетъ очень простыя соотношенія между численными коэффициентами диффузіи, вязкости и теплопроводимости газа. Но это не легко сдѣлать понятнымъ безъ болѣе подробнаго разсмотрѣнія теоріи, чѣмъ то позволяютъ положенныя намъ предѣлы. Точно также мы можемъ лишь указать, что она была успѣшно приложена къ объясненію явленій испаренія и диссоціаціи, которыя (какъ мы видѣли въ § 231) имѣютъ другъ съ другомъ значительное сходство. Въ первомъ случаѣ мы имѣемъ частицу жидкости, движущуюся столь быстро, что она сама собою отрывается отъ остальной массы вопреки дѣйствующимъ на нее молекулярнымъ силамъ. Во второмъ—сложная частица ударяется съ такою силою о другую, что ея составныя части разъединяются вопреки ихъ химическому сродству.

436. Мы видѣли въ § 418, что, кромѣ движеній газовой частицы, какъ пламаго, существуютъ вообще относительныя движенія различныхъ частей частицы. Эти движенія, по крайней мѣрѣ частью, сообщаются свѣтоносной средѣ въ формѣ поперечныхъ колебаній, и ими, вѣроятно, объясняется главная потеря энергіи въ формѣ лучей. Въ этомъ мы не можемъ быть, однако, безусловно увѣрены, ибо совершенно не знаемъ, какимъ именно образомъ энергія передается отъ обыкновенной матеріи свѣтоносной средѣ; возможно, что передача прямо

совершается и тогда, когда частица движется только как цѣлое. Въ такомъ случаѣ мы имѣли бы нѣчто производящее подобныя же дѣйствія, какъ сопротивляющаяся среда; но въ какой формѣ энергія, переданная такимъ образомъ, была бы запасаема или распространяема въ свѣтоносной средѣ—объ этомъ мы ничего не знаемъ.

437. Пока частица движется въ предѣлахъ своего свободнаго пути, мы должны ожидать, что ея внутреннія движенія будутъ совершенно опредѣленнаго періодическаго характера, подобно напр. движеніямъ стѣнокъ колокола. Поэтому, если всѣ частицы равны и сходны, то мы должны ожидать, что разрѣженные газы при достаточно высокой температурѣ будутъ издавать одинъ или болѣе лучей, соответствующихъ каждый совершенно опредѣленной длинѣ волны. Это отвѣчаетъ одной или болѣе свѣтлымъ линіямъ въ спектрѣ. Но даже при абсолютно равныхъ частицахъ эти линіи не могутъ быть совершенно рѣзкими; ибо, хотя періодъ колебанія всѣхъ частицъ одинъ и тотъ же, нѣкоторыя частицы приближаются къ наблюдателю, другія удаляются отъ него со скоростями, не исчезающими предъ скоростью свѣта. По этой причинѣ, дѣйствующей тѣмъ сильнѣе, чѣмъ выше температура, линіи будутъ имѣть нѣкоторую конечную (хотя малую) ширину. Въ моментъ столкновенія колеблющееся тѣло подвергается насилію, и періоды необходимымъ образомъ измѣняются. Это дѣйствіе въ результатѣ тоже стремится расширить линіи, но оно почти нечувствительно, если газъ очень разрѣженъ—кромѣ того случая, когда слой газа весьма толстъ, ибо тогда (какъ мы видѣли въ § 305) онъ дѣйствуетъ какъ черное тѣло.

Дѣйствіе сжатія, предполагая температуру неизмѣн-

ною, состоитъ въ уменьшеніи того времени, въ теченіе котораго частица свободна отъ столкновеній; слѣдовательно, излученіе, измѣненное вслѣдствіе ударовъ, составитъ большую, чѣмъ прежде, долю всего излученія. Это дѣйствіе все возрастаетъ при дальнѣйшемъ сжатіи, и линіи постепенно расширяются, пока мы не получимъ почти сплошной спектръ. Такой именно спектръ необходимо будетъ тогда, когда тѣло находится въ жидкомъ или твердомъ состояніи.

438. Еще одно важное обстоятельство, гдѣ опытъ также подтверждаетъ предвидѣнія теоріи, состоитъ въ томъ, что чѣмъ сильнѣе ударъ, тѣмъ больше будетъ число лучей, соответствующихъ колебаніямъ болѣе короткихъ періодовъ, и тѣмъ напряженнѣе колебанія болѣе длинныхъ періодовъ. Поэтому напряженность спектральныхъ линій возрастаетъ съ температурой, и вмѣстѣ съ тѣмъ появляются новыя болѣе преломляемости. Но мы не пойдемъ дальше въ этомъ разсмотрѣніи, такъ какъ на предыдущихъ страницахъ мы не входили въ подробности относительно методовъ и результатовъ спектральнаго анализа.

439. Остается, однако, одинъ пунктъ основного значенія, на который мы можемъ теперь бросить больше свѣта, а именно сущность доказательства *второго закона термодинамики* (§ 82). Доказательство, данное нами мимоходомъ въ § 93, вполнѣ основано на предположеніи (которое главнымъ образомъ принадлежитъ В. Томсону), что мы не можемъ превратить въ работу теплоту, происходящую только отъ болѣе холоднаго изъ двухъ тѣлъ, употребляемыхъ въ круговомъ процессѣ. Если мы взглянемъ на это положеніе въ смыслѣ опредѣленія § 410, то оно будетъ значить: что невозможно получить

работы посредствомъ процесса, который въ то же самое время повышаетъ внутреннюю полезную энергію взятой нами системы.

Клаузиусъ, который впервые согласилъ начало Карно съ истинной теоріей теплоты, привелъ въ пользу своего объясненія лишь слѣдующій доводъ, при помощи котораго онъ приходитъ къ положенію, аналогичному положенію § 93: «Это противорѣчитъ общему свойству теплоты, которая вездѣ показываетъ стремленіе уничтожать разницы температуры и, слѣдовательно, переходить отъ болѣе *теплаго* тѣла къ болѣе *холодному*».

Какъ мы увидимъ, теплота можетъ переходить (хотя почти въ безконечно маломъ количествѣ) отъ болѣе холодныхъ къ болѣе теплымъ тѣламъ. Термоэлектрический токъ отъ достаточнаго числа элементовъ можетъ нагрѣть тонкую проволоку до температуры болѣе высокой, чѣмъ температура котораго либо изъ спаевъ.

Нѣсколько лѣтъ позже Клаузиусъ далъ своему доводу слѣдующую форму: «Теплота не можетъ сама собою переходить отъ болѣе холоднаго тѣла къ болѣе теплomu». Слова «сама собою» онъ послѣ замѣнилъ словами «безъ компенсаціи». Тогда падаетъ возраженіе, которое можно было сдѣлать на основаніи упомянутого выше термоэлектрическаго явленія. Слѣдовательно, основное положеніе Клаузиуса окончательно будетъ: «При всѣхъ некомпенсированныхъ превращеніяхъ энтропія возрастаетъ».

440. Истинное основаніе второго закона термодинамики заключается въ чрезвычайно большомъ числѣ и чрезвычайной малости частицъ матеріи и въ происходящей отсюда невозможности имѣть дѣло съ отдельными частицами. Ибо мы можемъ безъ тренія передать

энергію поступательнаго движенія отъ одного тѣла къ другому; и такимъ образомъ, если бы могли дѣйствовать съ каждою частицею газа отдѣльно, мы могли бы передать, по крайней мѣрѣ, бѣольшую часть ихъ движенія одному и тому же тѣлу; поэтому полезная энергія системы могла бы быть значительно повышена безъ какого-либо приложенія работы извнѣ.

441. Если, возвращаясь къ § 423, мы предположимъ, что при движеніи поршня внутрь только тѣ мѣста его по частямъ подвигаются впередъ, которыя (въ данный моментъ) не испытываютъ удара со стороны частицъ. то названное слѣдствіе было бы выполнено: не было бы затрачено работы, энергія газа осталась бы неизмѣненною, а полезная энергія его была бы повышена. Многочисленность и малость частицъ газа дѣлаютъ это невозможнымъ; и такимъ образомъ мы вынуждены заключить, что для повышенія полезной энергіи газа безъ измѣненія всей его энергіи необходимо *понизить* часть энергіи, прилагая ее въ формѣ работы для сжатія газа и отводя затѣмъ эквивалентное количество ея въ формѣ теплоты.

На дѣлѣ, какъ видно изъ § 431, теплота можетъ сама собою переходить отъ болѣе холодныхъ тѣлъ къ болѣе теплымъ. Ибо то самое разсужденіе, которое прилагается къ относительнымъ количествамъ двухъ различныхъ газовъ въ разныхъ частяхъ смѣси, примѣнимо также и къ относительному числу медленно и быстро движущихся частицъ одного и того же газа, но, какъ и въ первомъ случаѣ — лишь въ томъ же чрезвычайно маломъ масштабѣ.

442. Клеркъ-Максвеллъ разобралъ вопросъ съ этой точки зрѣнія съ большою ясностью. Онъ говоритъ:

«Одинъ изъ наилучше установленныхъ въ термодинамикѣ фактовъ есть тотъ, что въ системѣ, заключенной въ оболочку, которая не допускаетъ ни измѣненія объема, ни проникновенія теплоты, и въ которой температура и давленіе повсемѣстно одинаковы — невозможно произвести какое-либо неравенство температуры или давленія безъ затраты работы. Это есть второй законъ термодинамики, законъ несомнѣнно истинный до тѣхъ поръ, пока мы можемъ имѣть дѣло лишь съ тѣлами въ ихъ цѣломъ и не въ состояніи получить отдѣльныхъ молекулъ тѣла и обращаться съ ними. Но если мы представимъ себѣ существо, котораго способности настолько обострены, что оно можетъ слѣдить за каждой молекулой въ ея пути, то такое существо, хотя его свойства были бы въ сущности столь же конечны, какъ наши, было бы въ состояніи сдѣлать то, что для насъ теперь невозможно. Ибо мы видѣли, что молекулы въ сосудѣ съ воздухомъ при однообразной температурѣ движутся со скоростями отнюдь не одинаковыми, хотя средняя скорость какого-либо большого числа ихъ, произвольно выбраннаго, почти въ точности одна и та же. Теперь представимъ себѣ, что такой сосудъ раздѣленъ на двѣ части *A* и *B* перегородкой, въ которой сдѣлано маленькое отверстіе, и что существо, могущее видѣть отдѣльныя молекулы, открываетъ и закрываетъ отверстіе, пропуская изъ *A* въ *B* только болѣе быстрыя молекулы, а изъ *B* въ *A* только болѣе медленныя. Тогда оно безъ затраты работы повысило бы температуру въ *B* и понизило бы въ *A* — противно второму закону термодинамики.

«Это одинъ изъ тѣхъ примѣровъ, въ которыхъ заключенія, выведенныя нами изъ нашего опыта надъ тѣ-

лами, состоящими изъ огромнаго множества молекулъ, могутъ оказаться неприменимыми къ болѣе тонкимъ наблюденіямъ и опытамъ, которые могъ бы сдѣлать тотъ, кто былъ бы въ состояніи обращаться съ отдѣльными молекулами, съ которыми мы имѣемъ дѣло лишь въ большихъ массахъ».

443. Надо надѣяться, что со временемъ математическая обработка этой статистической (не динамической) задачи будетъ сдѣлана вообще доступной учащимся. Это является вполне возможнымъ, хотя повидимому до сихъ поръ еще не сдѣлано было въ этомъ направленіи попытки, заслуживающей вниманія.

Но истинная трудность всей теоріи, которая, даже когда она будетъ преодолена, вѣроятно, потребуетъ для своей разработки методовъ, вполне выходящихъ за предѣлы доступнаго обыкновенному читателю, состоитъ въ томъ, что эта теорія (поскольку она разработана до сихъ поръ) не приведена въ согласіе съ наблюдаемыми величинами удѣльныхъ теплотъ газовъ вообще. Дабы объяснить большое число линій въ спектрѣ раскаленнаго газа, необходимо предположить, что составныя части каждой частицы имѣютъ много *степеней свободы*, т. е. совершенно различныхъ родовъ относительныхъ движеній. Но, по крайней мѣрѣ при нынѣшнемъ способѣ приложения теоріи, каждое усложненіе газовой частицы повидимому требуетъ, чтобы отношеніе ея внутренней энергіи къ энергіи поступательнаго движенія дѣлалось больше. Такимъ образомъ, вычисленные значенія удѣльныхъ теплотъ вообще слишкомъ велики. Но трудность ненужнымъ образомъ еще увеличена предположеніемъ, что вся энергія, въ среднемъ, *одинаково* распределена между частицами во всѣхъ степеняхъ свободы. Это не вѣроятно,

по крайней мѣрѣ насколько *характеръ* излученіе газа при различныхъ температурахъ можетъ дать намъ указанія относительно даннаго предмета. Но подобныя трудности, хотя конечно важныя, не должны мѣшать принятію теоріи, выѣстъ изящной и простой, которая уже вполне объяснила цѣлый рядъ повидимому не связанныхъ между собою фактовъ.

144. При современномъ состояніи науки мы не способны идти по слѣдамъ Клеро, д'Аламбера и другихъ, которые, найдя, что вычисленное движеніе лунныхъ узловъ значительно расходится съ данными наблюденія, предложили измѣнить законъ тяготѣнія (обратной пропорціональности квадратамъ разстояній) вопреки почти безчисленному ряду фактовъ, которые точно объяснялись при его помощи; они совершенно упустили изъ виду, что приноровить законъ къ вычисленному ими отдѣльному явленію значило бы сдѣлать его совершенно непригоднымъ для тѣхъ цѣлей, которымъ онъ вполне удовлетворялъ прежде.

145. Подобныя именно трудности, которыя даютъ себя знать во всѣхъ частяхъ столь обширной нынѣ физической науки, и представляютъ главнымъ образомъ прелесть борьбы для истинныхъ ея приверженцевъ. Если бы наука вся была сведена къ достовѣрности, то ее можно было бы воплотить въ одну огромную энциклопедію, и слишкомъ мало осталось-бы отъ нея такого, что для людей науки могло представить сколько-нибудь больше того спокойнаго или, скорѣе, лѣниваго интереса, съ которымъ мы читаемъ въ хорошемъ географическомъ лексиконѣ о такихъ мѣстностяхъ, какъ Банкокъ, Акисаръ или Тортуга. Законченная наука представила бы далеко меньше интереса, чѣмъ мертвый языкъ: она опу-

стилась-бы до положенія загадки, ключъ къ которой уже найденъ.

Но если мы только подумаемъ о понятіяхъ, которыя мы пытаемся выразить словами *время*, *пространство* и *вещество*, то увидимъ, что какъ-бы далеко ни простирались открытія, «ясное» для насъ никогда не можетъ составить больше нѣкоторой безконечно малой части «безграничнаго поля». Ни одна часть его, однако, не можетъ считаться, строго говоря, недоступною для человѣческаго разума, предоставленнаго своимъ собственнымъ силамъ, если нѣтъ недостатка во времени и терпѣніи. Но далеко по ту сторону въ одномъ смыслѣ, хотя въ другомъ смыслѣ всегда въ связи съ нами самими, стоятъ тѣ высшія тайны истинной Метафизики, которыхъ намъ никогда не раскроютъ наши чувства и разумъ.

446. *Содержаніе §§ 417—445.* Природа теплоты въ тѣлѣ. Зернистое строеніе вещества. Кинетическая теорія газовъ. Вычисленіе скорости водородныхъ частицъ. Статистическій методъ. Виріаль. Законъ Авогадро. Средній свободный путь. Число столкновеній. Транспирація газовъ. Вязкость, диффузія, теплопроводимость. Истинное основаніе второго закона. Трудности, представляющіяся въ кинетической теоріи.

НЕОБХОДИМЫЕ ПОПРАВКИ.

Стран.	Строка.	Напечатано:	Слѣдуетъ:
20	6 сверху	кинетической	кинетическѣй
25	3 снизу	imponderabilia	imponderabilia
28	5 „	Есть	Если
33	10 сверху	repulsive	repulsive
35	8 „	*)	‘)
	(и въ выносѣхъ)	„	„
49	16 снизу	*)	‘)
	(и въ выносѣхъ)	„	„
51	6 снизу	большей	большой
54	12 сверху	въсовъ	въсовъ воды
62	12 „	воды	падающей воды
77	8 „	проводникъ	непроходникъ
90	2 снизу	$\frac{l_t - l_0}{l}$	$\frac{l_t - l_0}{l_0}$
101	5 „	селенита	«копьевиднаго» се- ленита
103	10 „	$\frac{V_t - V}{V_0}$	$\frac{V_t - V_0}{V_0}$
104	6 „	$3KV_0t$	$3KV_0t$
111	11 „	(это аналогично	это (аналогично
127	15 „	Реамюровой	Реомюровой
130	13 „	Реамюру	Реомюру
140	3 сверху	желательное	желательно
176	11 „	представлено	предоставлено.
191	11 снизу	$\frac{S}{s}$	$\frac{S}{s}$
235	3 „	она	послѣдняя
260	5 „	Слова <i>разъ на всегда</i>	должно выбросить.
262	4 сверху	проводимость же- лѣза къ теплотѣ	проводимость тепло- ты желѣзомъ
296	10 снизу	каково	каково бы
320	1 „	$\alpha(1 - e^{-\alpha x})$	$\alpha(1 - e^{-\alpha x})$
325	9 сверху	вѣрка	вѣрка].
342	9 „	По стольку	По стольку именно
358	9 снизу	[]	[K]
359	4 сверху	денинахъ	единицахъ
398	11 „	мѣсь	сметъ
416	5 снизу	$(\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2})$	$(\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2})^2$
418	14 сверху	какова	какова бы

СОДЕРЖАНІЕ.

СТР.

Предисловіе автора 1—v

ГЛАВА I.

Основныя начала 1

ГЛАВА II.

Введеніе 10

ГЛАВА III.

О слѣѣ и энергіи 15

ГЛАВА IV.

Предварительный очеркъ предмета 25

ГЛАВА V.

Расширеніе твердыхъ тѣлъ 86

ГЛАВА VI.

Расширеніе жидкостей и газовъ 107

ГЛАВА VII.

Термометры 126

ГЛАВА VIII.

Измѣненіе молекулярнаго состоянія. Плавленіе и отвер-
дѣваніе 144

ГЛАВА IX.

Измѣненіе молекулярнаго состоянія. Испареніе и ожи-
женіе 160

ГЛАВА X.

Измѣненіе температуры. Удельная теплота 182

ГЛАВА XI.

Термоэлектричество 198

ГЛАВА XII.

Другія дѣйствія теплоты 221

ГЛАВА XIII.

Соединеніе и диссоціація 234

ГЛАВА XIV.

Проводимость теплоты 249

ГЛАВА XV.

Переносъ теплоты (конвекція) 279

ГЛАВА XVI.

Излученіе 290

ГЛАВА XVII.

Излученіе и поглощеніе 303

ГЛАВА XVIII.

Излученіе 334

ГЛАВА XIX.

Единицы и измѣренія 351

ГЛАВА XX.

Индикаторная діаграмма Уатта 361

ГЛАВА XXI.

Начала термодинамики 392

ГЛАВА XXII.

Природа теплоты 422

АНТРОПОЛОГІЯ.

ТОПИНАРА. Переводъ подъ редакціею профессора М. И. Мечникова.
Съ 52 рис. въ текстѣ. 435 стр. Ц. 4 р., съ пер. 4 р. 30 к.

ИСТОРІЯ МАТЕРІАЛИЗМА

И КРИТИКА ЕГО ЗНАЧЕНІЯ ВЪ НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ.

Фр. Альб. ЛАНГЕ. Перев. съ 3-го нѣм. изд. Н. Н. Страхова.

Томъ I-й: Исторія матеріализма до Канта. 398 стр.

Томъ II-й: Исторія матеріализма послѣ Канта. 495 стр.

Цѣна каждаго тома 2 р. 50 к., съ перес. 2 р. 80 к.

сочиненія ДАВИДА РИКАРДО.

Пер. Н. Зиберы, съ приложеніями переводчика. 685 стр.

Ц. 3 р. 50 к., съ перес. 4 р.

ИСТОРІЯ ТЕОРИИ СТАТИСТИКИ.

Въ монографіяхъ Вагнера, Рюмелина, Этингена и Швабе. Пер. съ нѣм. подъ редакціею и съ дополненіями проф. Яссона, съ 3-мя таблицами чертежей, 270 стр. Ц. 2 р., съ перес. 2 р. 25 к.

В. А. ЗАЙЦЕВЪ.

РУКОВОДСТВО ВСЕМІРНОЙ ИСТОРІИ.

ДРЕВНЯЯ ИСТОРІЯ ВОСТОКА.

Съ 4 картами, 2 таблицами іероглифическихъ и клинообразныхъ письменъ, 287 стр. Ц. 2 р., съ перес. 2 р. 25 к.

ДРЕВНЯЯ ИСТОРІЯ ЗАПАДА.

Томъ I-й. Зликая эпоха, съ 2 картами. 646 стр. Ц. 4 р., съ перес. 4 р. 40 к.

ОСНОВЫ НАУКИ.

ТРАКТАТЪ О ЛОГИКѢ И НАУЧНОМЪ МЕТОДѢ.

СТЕННИ ДЖЕВОНСА.

Пер. съ англ. М. А. Антоновича. 735 стр. Ц. 4 р. 50 к., съ пер. 5 р.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ УЧЕБНИКЪ ЛОГИКИ

ДЕДУКТИВНОЙ И ИНДУКТИВНОЙ, СЪ ВОПРОСАМИ И ПРИМѢРАМИ.

Ст. Джевонса.

Пер. съ англ. М. А. Антоновича. 336 стр. Ц. 2 р., съ пер. 2 р. 30 к.

З В У К Ъ.

Рядъ простыхъ, занимательныхъ и недорогихъ опытовъ, имѣющихъ предметомъ явленія звука, для всѣхъ возрастовъ. Альфреда Маршалла Майера. Съ 60 рисунками. Перев. съ англ. М. А. Антоновича. 165 стр. Ц. 1 р., съ перес. 1 р. 20 к.

С В Ѣ Т Ъ.

Рядъ простыхъ, занимательныхъ и недорогихъ опытовъ, имѣющихъ предметомъ явленія свѣта, для всѣхъ возрастовъ. А. Майера и Баршуса. Съ 60 рис. Пер. съ англ. М. А. Антоновича. 84 стр. Ц. 50 к.

ОБЩЕДОСТУПНЫЙ КОСМОСЪ.

Лекціи Роско: Изъ чего составлена земля.—Лонаеръ: Почему таковъ составъ земли, каковъ онъ есть.—Уильямсонъ: Последовательность жизни на землѣ. Съ 50 рис. въ текстѣ. Ц. 1 р. 25 к., съ пер. 1 р. 50 к.

СЕРІЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХЪ УЧЕБНИКОВЪ.

Переводъ съ англійскаго М. А. Антоновича.

Введеніе. Проф. Гексли. Ц. 40 к., съ пер. 50 к.—Химія. Проф. Роско. Съ 36 рис. въ текстѣ. Ц. 40 к., съ пер. 50 к.—Физика. Проф. Бальф-Стюарта. Съ 48 рис. въ текстѣ. Ц. 50 к., съ пер. 60 к.—Физическая географія. Проф. Гейни. Съ 20 рис. въ текстѣ. Ц. 60 к., съ пер. 70 к.—Геологія. Проф. Гейни. Съ 46 рис. въ текстѣ. Ц. 75 к., съ пер. 85 к.—Физиологія. Д-ра Фостера. Съ 18 рис. Ц. 75 к., съ пер. 85 к.—Астрономія. Нормана Лонаера. Съ 48 рис. Ц. 75 к., съ пер. 85 к.

О НОВѢЙШИХЪ УСПѢХАХЪ ФИЗИЧЕСКИХЪ ЗНАНІЙ.

Лекціи проф. Эддиб. ун-ва. П. Г. Тэта. Пер. подъ редакц. И. М. Сѣченова. Съ 24 рис. въ текстѣ. 339 стр. Ц. 2 р. 50 к., съ пер. 2 р. 75 к.

ПРАКТИЧЕСКІЯ РАБОТЫ ПО БОТАНИКѢ И ЗООЛОГІИ.

ГЕКСЛИ И МАРТИНА.

Переводъ съ англійскаго А. Я. Гердъ.

218 стр. Ц. 1 руб. 25 коп., съ пер. 1 руб. 50 коп.

КРАТКІЙ КУРСЪ ЕСТЕСТВОВѢДѢНІЯ.

Составилъ А. Я. Гердъ.

Удостоенъ преміи Императора Петра Великаго и въ первомъ изданіи одобренъ какъ руководство для гимназій.

Въ 3 част. въ 207 рисунк. въ текстѣ. Изд. 4-е. 257 стр. Ц. 1 р. 60 к. съ перес. 1 р. 80 к.

ОПЫТНАЯ МЕХАНИКА. С. С. ВОЛЬ.

Курсъ лекцій, чит. въ Корол. Ирл. Кол. Наукъ. Пер. съ англ. подъ ред. И. Н. Любавина. Съ 100 рис. въ текстѣ. 358 стр. Ц. 3 р., съ пер. 3 р. 80 к.

УЧЕБНИКЪ ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФІИ.

Проф. А. Гейни. Пер. съ англ. А. Я. Гердъ. Съ 78 рис. въ текстѣ и 10 картин. въ прилож. 370 стр. Ц. 2 р., съ перес. 2 р. 30 к.

ГИМНАСТИКА ГОЛОСА,

ОСНОВАННАЯ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХЪ ЗАКОНАХЪ.

Руководство къ упражненію и правильному употребленію органовъ рѣчи и пѣнія.

ОСКАРА ГУТМАНА.

128 стр. Ц. 50 к., съ перес. 65 к.

О ПСИХОМОТОРНЫХЪ ЦЕНТРАХЪ

И РАЗВИТИИ ИХЪ У ЧЕЛОВѢКА И ЖИВОТНЫХЪ.

Проф. И. Р. Тарханова. Цѣна 1 р., съ перес. 1 р. 20 к.

ЛЕКЦІИ ОБЩЕЙ ТЕРАПІИ. Проф. В. МАНАССЕЙНА.

Часть 1-я. 268 стр. Ц. 1 р. 50 к., съ перес. 1 р. 70 к.

ДОМАШНІЙ УХОДЪ ЗА БОЛЬНЫМИ.

Д-ра Нурвуазье, врача при общинѣ діакониссъ въ Риги. Съ рис. въ текстѣ Пер. съ 3-го нѣмецк. изд. М. Ловмовой. Съ предисл. проф.

ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ФИЗИОЛОГИИ,

кратко и общедоступно изложенные В. Прейеромъ, ординари. проф. физиологии.
Пер. И. Р. Гарханова. 265 стр. Ц. 1 р. 25 к., съ перес. 1 р. к.

БЕСѢДЫ О ЗЕМЛѢ И ТВАРЯХЪ НА НЕЙ ЖИВУЩИХЪ.

Проф. А. Н. Бекетова. Изд. 5-е, съ 18 рис. въ текстѣ. Ц. 80 к., съ перес. 1 руб.

НАРОДЫ ТУРЦИИ.

Двадцать лѣтъ пребыванія среди болгаръ, грековъ, албанцевъ, турокъ и армянъ.
Пер. съ англ. 300 стр. Ц. 3 р., съ пер. 3 р. 30 к.

ОЧЕРКИ ЦЕЙЛОНА И ИНДИИ.

ИЗЪ ПУТЕВЫХЪ ЗАМѢТОКЪ РУССКАГО.

Соч. М. П. Минаева.

2 части. 522 стр. Ц. 2 р. 50 к., съ перес. 2 р. 80 к.

О ПОГЛОЩЕНИИ УГОЛЬНОЙ КИСЛОТЫ СОЛЯНЫМИ РАСТВОРАМИ И КРОВЬЮ.

И. М. Сѣченова. 164 стр. больш. форм. Ц. 3 руб., съ перес. 3 р. 30 к.

СКОТОВОДСТВО.

Г. Заттегаста. Перев. подъ редакціею Д-ра О. А. Гримма. 2 тома
съ 200 рис. въ текстѣ. Ц. 7 руб. съ пересылкою.

Е. СМАЙЛЬСЪ.

ИСТОРИЯ ШОТЛАНДСКАГО НАТУРАЛИСТА

Томаса Эдварда.

Перев. С. И. Смирновой. 163 стр. Ц. 1 р., съ перес. 1 р. 20 к.

ПИТАНІЕ ЧЕЛОВѢКА ВЪ ЕГО НАСТОЯЩЕМЪ И БУДУЩЕМЪ.

А. Н. Бекетовъ. Ц. 50 коп., съ пересылкою 60 к.

ЛИНГВИСТИКА.

Абеля Оведака. Переводъ съ франц. Ц. 2 р., съ перес. 2 р. 30 к.

ЭЛЕМЕНТЫ ЭМВРИОЛОГИИ.

Фостера и Бальфура. Съ 70 рисунк. Пер. съ англ. подъ ред. О. А. Грима.
350 стр. Ц. 2 р., съ перес. 2 р. 30 к.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПОЛИТИКА.

шесть лекцій, читанныхъ въ королевскомъ институтѣ въ 1873 г., и
единство исторіи.

Лекцій, читанныхъ въ Кембриджскомъ университетѣ, Эд. Фримана. Перев. съ
англ. Н. Корникова. 376 стр. Ц. 2 р. 50 к. съ пересылкою 2 р. 80 к.

М. ФОСТЕРЪ. НАЧАЛЬНЫЙ ПРАКТИЧЕСКІЙ КУРСЪ ФИЗИОЛОГИИ.

Пер. съ англ. С. В. Пантелѣевой. 233 стр. Ц. 1 р. 50 к., съ пер. 1 р. 70 к.

О НЕНОРМАЛЬНОСТИ МОЗГОВОЙ ЖИЗНИ

современнаго культурнаго человѣка. М. М. Манассеиной. Ц. 1 р. 25 к.

Гофманъ. Руководство къ Судебной мѣдици; пер. съ англ. проф.
Сорокина. Ц. 4 р.

Клазиусъ. О запасахъ энергіи въ природѣ. пер. Флугъ; ц. 30 к.

Сочиненія Корнелія Тацита.

Пер. съ примѣч. и со статьей о Тацитѣ и его сочиненіяхъ В. И. Модестова
Т. 1. Агрикола. Германія. Исторія. Ц. 2 р. 50 к. Т. 2. Летопись. Раз-
говоръ объ ораторахъ. Ц. 3 р. 50 к.