



С. Карно

1796—1832

Об эффективности тепловых машин

Интенсивное развитие промышленности в Англии и Франции в конце XVIII — начале XIX вв., основанное на широком использовании паровых машин, происходило в условиях, когда теория тепловых явлений находилась в зачаточном состоянии. На рубеже веков вновь обострились дискуссии о природе тепла, что привело к постановке ряда важных экспериментальных исследований (Б. Румфорд, Г. Дэви, Дж. Дальтон, П. Дюлонг и А. Пти и др.). Тем не менее в первой четверти XIX в. наука о тепловых явлениях и теплотехника развивались фактически независимо друг от друга. Первым исследователем, попытавшимся разрушить этот барьер, был французский инженер С. Карно.

Никола Леонард Сади Карно родился 1 июня 1796 г. в Париже. Он был старшим сыном выдающегося военачальника, политического деятеля и ученого Л. Карно, бывшего в то время членом Директории. Когда Сади был еще ребенком, его отец в результате изменения политической ситуации был отстранен от дел и таким образом у него появилось свободное время для занятий с сыновьями. Сади получил прекрасное домашнее воспитание и образование и некоторое время учился в лицее Карла Великого, по окончании которого поступил в знаменитую Политехническую школу. Во время учебы в Политехнической школе (1812—1814) Карно не только слушал лекции Пуассона, Гей-Люссака, Ампера, Араго, но и активно участвовал в политической жизни. Он окончил школу в числе лучших и был направлен для завершения образования в инженерную школу в Метце. Там молодой инженер готовит свои первые научные работы, оставшиеся, правда, неопубликованными.

В конце 1816 г. Карно получает чин лейтенанта и в течение нескольких лет, переезжая из гарнизона в гарнизон, выполняет рутинные обязанности военного инженера. Неудовлетворенный своей деятельностью и, главное, невозможностью вести научные исследования, Карно участвует в конкурсе на замещение вакантной должности в штабе корпуса в Париже. Выиграв этот конкурс, он переезжает в столицу, где продолжает учиться, посещая

лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, Консерватории искусств и ремесел. В Консерватории Карно познакомился с молодым физиком Н. Клеманом, который в это время занимался исследованием свойств газов. Общение с Клеманом, а также посещение заводов и фабрик возбудили у Карно интерес к проблеме совершенствования паровых машин.

В 1812 г. Сади посетил в Магдебурге отца, высланного из Франции. Обсуждение с ним научно-технических проблем (сам Л. Карно также в свое время занимался теорией машин, правда, с позиций механики), вероятно, послужило толчком к исследованию эффективности тепловых машин, завершившемуся изданием в 1824 г. сочинения «Размышления о движущей силе огня». Это сочинение, написанное очень ясно (Карно при подготовке книги заставлял своего брата читать и критиковать отдельные части рукописи, стремясь добиться максимальной доступности изложения), было благосклонно принято в Академии наук, где был зачитан его реферат. Однако этим дело и ограничилось. Очень скоро о книге молодого ученого забыли.

В 1827 г. Карно был снова отозван из Парижа для службы в провинции. Вскоре он вышел в отставку в чине капитана. По семейной традиции Карно принимал участие в политической жизни и приветствовал июльскую революцию 1830 г. Однако он не принял программу нового правительства и отказался войти в палату депутатов. Получив отставку, Карно с еще большей активностью занялся научными исследованиями. У него были обширные планы экспериментального изучения свойств паров и газов. Однако реализовать эти планы не удалось. 24 августа 1832 г. Карно умер от холеры. По законам того времени все его имущество, в том числе и рукописи, было уничтожено.

Спустя десять лет после выхода в свет «Рассуждений» Карно, уже после смерти автора, к его идеям было привлечено внимание ученых. Французский физик Б. Клапейрон изложил и развил теорию Карно, придав ей математическое оформление. Благодаря Клапейрону представления Карно о тепловых процессах стали известны другим ученым и послужили основой развития классической термодинамики в трудах У. Томсона (Кельвина), Р. Клаузиуса и др.

В своей работе Карно ввел в научный обиход множество понятий, сохранившихся в термодинамике до наших дней. Это и понятия идеальной тепловой машины, идеального цикла, обратимости процесса как условия его предельной эффективности и т. д. Однако главной заслугой ученого является выдвижение идеи о необходимости перепада температур для создания циклически действующей тепловой машины, которая лежит в основе второго начала термодинамики.

Карно построил свою теорию, основываясь на представлении о существовании особой материи тепла — теплорода, которое было впоследствии отвергнуто наукой. Следует, однако, отметить, что сам Карно сознавал трудности теории теплорода. В отрыв-

вочных записках, чудом уцелевших после смерти ученого, можно найти свидетельства того, что в конце жизни он склонялся к отказу от этой теории. На это указывает, например, такое суждение Карно: «Теплота есть не что иное, как движущая сила или, скорее, движение, которое изменило свою форму», — а также проекты экспериментов, по замыслу близкие к тем, что были впоследствии проведены Джоулем. Возможно, что, излагая принципиально новые взгляды на принцип действия тепловых машин, Карно не хотел затенять их дискуссией о природе теплоты и поэтому сформулировал их на старом языке теории теплорода. Этот недостаток теории Карно был убран уже в середине XIX в., большинство же ее выводов осталось справедливым и после победы кинетической теории теплоты.

Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу

Никто не сомневался, что теплота может быть причиной движения, что она даже обладает большой двигательной силой: паровые машины, ныне столь распространенные, являются этому очевидным доказательством.

Теплоте должны быть приписаны те колоссальные движения, которые поражают наш взгляд на земной поверхности; она вызывает движения атмосферы, поднятие облаков, падение дождя и других осадков, заставляет течь потоки воды на поверхности земного шара, незначительную часть которых человек сумел применить в свою пользу; наконец, землетрясения и вулканические извержения также имеют причиной теплоту.

Из этих огромных резервуаров мы можем создавать движущую силу, нужную для наших потребностей; природа, повсюду предоставляя горючий материал, дала нам возможность всегда и везде получать теплоту и сопровождающую ее движущую силу. Развивать эту силу и применять ее для наших нужд — такова цель тепловых машин. <...>

Часто поднимали вопрос: ограничена или бесконечна движущая сила тепла*¹, существует ли определенная граница для возможных улучшений, граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, — или, напротив, возможны безграничные улучшения? Также долгое время искали и ищут теперь, не существует ли агентов, предпочтительных водяному пару, для развития движущей силы огня; не представляет ли, например, атмосферный воздух в этом отношении больших

* Мы употребляем здесь выражение «движущая сила», чтобы обозначить полезное действие, которое может дать двигатель. Это действие всегда можно свести к поднятию груза на определенную высоту; оно измеряется, как известно, произведением веса груза на высоту, на которую груз поднят.

преимуществ. Мы ставим себе задачу подвергнуть здесь эти вопросы внимательному рассмотрению.

Явление получения движения из тепла не было рассмотрено с достаточно общей точки зрения. Его исследовали только в машинах, природа и образ действия которых не позволяли ему принять того полного развития, на которое оно способно. У подобных машин это явление сказывается в извращенном и неполном виде; поэтому трудно узнать его основы и изучить его законы.

Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам*, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него ни производилось воздействие.

Машины, не получающие движения от тепла, а имеющие двигателем силу человека или животных, падение воды, поток воздуха и т. д., могут быть изучены до самых мелких деталей посредством теоретической механики. Все случаи предвидены, все возможные движения подведены под общие принципы, прочно установленные и приложимые при всех обстоятельствах. Это характерное свойство полной теории. Подобная теория, очевидно, отсутствует для тепловых машин. Ее нельзя получить, пока законы физики не будут достаточно расширены и достаточно обобщены, чтобы наперед можно было предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело.

Мы будем в последующем предполагать знание, хотя бы приблизительное, различных частей, составляющих обычную паровую машину. Поэтому мы считаем излишним объяснять, что такое топка, паровой котел, паровой цилиндр, поршень, холодильник и т. д.

Получение движения в паровых машинах сопровождается одним обстоятельством, на которое мы должны обратить внимание. Это обстоятельство есть восстановление равновесия теплорода, т. е. переход теплорода от тела, температура которого более или менее высока, к другому, где она ниже. В самом деле, что происходит в паровой машине, находящейся в движении? Теплород, полученный в топке благодаря горению, проходит через стенки котла, дает рождение пару и с ним как бы соединяется. Пар увлекает его с собой, несет в цилиндр, где он выполняет некоторую службу, и оттуда в холодильник, где, соприкасаясь с холодной водой, пар сжижается. Холодная вода холодильника поглощает в конечном счете теплород, полученный от сгорания. Она согревается паром, как если бы была поставлена непосредственно на топку. Пар здесь только средство переноса теплорода; он

* Мы различаем здесь паровые машины и тепловые машины вообще: последние могут употреблять любой агент, например водяной пар или что-нибудь другое для развития движущей силы.

выполняет ту же роль, что и при отоплении бань паром, с той только разницей, что здесь его движение становится полезным.

В процессах, которые мы описали, легко узнать восстановление равновесия теплорода, его переход от тела более или менее нагретого к телу более холодному. Первое из этих тел — сожженный в топке воздух, второе — вода холодильника. Восстановление равновесия теплорода происходит между ними если не полностью, то, во всяком случае, отчасти, так как, с одной стороны, сожженный воздух, выполнив свою роль, побыв в соприкосновении с котлом, уйдет в трубу с температурой более низкой, чем та, которую он получил при сгорании, и, с другой — вода холодильника, оживив пар, удалится из машины с температурой более высокой, чем она была первоначально.

Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода², а его переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия — равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, такое, как горение, или что-нибудь иное. Мы увидим, что этот принцип приложим ко всем машинам, приводимым в движение теплотой.

Согласно этому принципу, недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезной³. В самом деле, если бы вокруг нас были тела только такие же горячие, как и топка, каким образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах*, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях, потому что выполняет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре; иначе она была бы им вскоре заполнена или, вернее, была бы насыщена им еще раньше**. Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы. Водяной пар есть одно из средств обнаружения этой силы, но не единственное: все тела природы могут быть применены для этого; все тела способны к изменению

* Некоторые машины высокого давления выбрасывают пар в атмосферу вместо того, чтобы его конденсировать: их употребляют главным образом там, где трудно получить достаточный приток холодной воды для конденсирования.

** Существование воды в жидком состоянии, обязательно предполагаемое здесь, так как без нее паровые машины не могли бы действовать, возможно только при давлении, способном мешать воде испаряться, а именно при давлении, равном или превосходящем упругость пара при данной температуре. Если подобное давление не производилось бы атмосферным воздухом, то в одно мгновение развился бы водяной пар в количестве, достаточном, чтобы производить то же давление, и все время нужно было бы преодолевать это давление, чтобы выбрасывать пар из машины в новую атмосферу. Это равносильно преодолению упругости, которая остается у пара после конденсирования в обычном способе.

Если бы на поверхности земного шара царствовала очень высокая температура, какая, без сомнения, существует внутри него, то все воды океанов были бы в виде пара в атмосфере и не имело бы ни одной капли в жидком состоянии.

объема, к сжатию и расширению при действии тепла и холода; все способны при изменении своего объема побеждать некоторые сопротивления, и, таким образом, развивать движущую силу.

Здесь уместно задать себе следующий, одновременно любопытный и важный вопрос: неизменна ли по величине движущая сила тепла или она меняется вместе с агентом, с помощью которого она развивается, с промежуточной средой, выбранной как орудие действия теплоты?

Ясно, что этот вопрос может быть задан только для определенного количества теплоты и для заданной разности температур. Например, пусть тело *A* поддерживается при температуре 100 °С, а другое тело *B* — при температуре 0 °С. Спрашивается, какое количество движущей силы может быть получено при переносе определенного количества теплорода (например, того, которое необходимо, чтобы расплавить 1 кг льда) от первого из этих тел ко второму; спрашивается, будет ли это количество движущей силы обязательно ограниченным, меняется ли оно с веществом, употребляемым для ее проявления, представляет ли водяной пар в этом отношении более или менее значительные преимущества перед парами спирта, ртути, перед постоянным газом или каким-либо другим веществом.

Мы попытаемся ответить на эти вопросы с помощью установленных выше понятий.

Очевидно или по крайней мере становится очевидным после размышления о расширении, производимом теплотой, следующее: повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы. Обратное: повсюду, где можно затратить эту силу, возможно образовать разность температур и нарушить равновесие теплорода. Удар, трение тел — разве это не суть средства поднять их температуру, привести их в более теплое состояние, чем окружающие предметы, нарушить равновесие теплорода там, где это равновесие прежде существовало? То, что температура газообразных жидкостей повышается при сжатии и понижается при расширении, есть результат опыта. Вот верное средство изменять температуру тел и нарушать равновесие теплорода столько раз, сколько вздумается, посредством одного и того же тела. Водяной пар, употребляемый обратным образом, чем его применяют в паровых машинах, можно рассматривать как средство нарушения равновесия теплорода⁴. Чтобы в этом убедиться, достаточно внимательно продумать, каким образом получается движущая сила действием теплоты на водяной пар.

Представим себе два тела *A* и *B*, поддерживаемые оба при постоянной температуре, причем температура *A* выше температуры *B*. Эти два тела, которым можно отдавать теплоту и брать ее не меняя их температуры, будут служить двумя бесконечными резервуарами теплорода. Мы назовем первое нагревателем, второе — холодильником.

Если мы хотим получить движущую силу, перенося опреде-

ленное количество теплоты от тела A к телу B , то можно поступать следующим образом.

1. Отнять теплород от тела A для образования пара, т. е. заставить это тело выполнить роль топки или, вернее, металла, из которого сделан котел в обыкновенных машинах; мы предполагаем, что пар образуется как раз при температуре тела A .

2. Впустить пар в расширяющийся сосуд, например цилиндр с поршнем; объем сосуда увеличится, а вместе с тем увеличится объем и пара. Расширившийся пар понизит свою температуру, как это случается со всеми упругими жидкостями⁵; предположим, что это разрежение длилось до тех пор, пока температура не стала равной температуре тела B .

3. Сконденсировать пар, приводя его в соприкосновение с телом B и производя на него одновременно постоянное давление, пока он окончательно не превратился в жидкость. Тело B выполнит здесь роль воды холодильника, с той только разницей, что оно конденсирует пар, не смешиваясь с ним и не меняя своей температуры*.

Операции, которые здесь описаны, могут быть проведены в одном направлении или в обратном. Ничто не препятствует образованию пара с помощью теплорода тела B и при температуре этого тела сжатие его так, чтобы он нагрелся до температуры тела A , и, наконец, конденсации его в соприкосновении с этим телом и продолжению сжатия до полного ожидения.

Нашими первыми операциями одновременно получалась движущая сила и производился перенос теплорода от тела A к телу B ; обратными операциями одновременно затрачивалась движущая сила и возвращался теплород от тела B к телу A . Но если действовать тем и другим образом и тем же количеством пара, и нет никаких потерь ни в движущей силе, ни в теплороде, то количество движущей силы, произведенной в первом случае, будет равно тому, которое было затрачено во втором, и количество теплорода, прошедшее в первом случае от тела A к телу B , будет равно количеству теплорода, возвратившегося во втором случае от тела B к телу A . Можно делать бесконечное число операций этого рода, так что в конце концов не будет ни производственной движущей силы, ни перехода теплорода от одного тела к другому.

Значит, если бы существовали средства, более выгодные для использования тепла, чем те, которыми мы пользовались, т. е. если бы было возможно каким бы то ни было методом получить от теплорода большее количество движущей силы, чем мы получили первой серией наших операций, то стоило бы только употребить часть этой силы для возвращения указанным методом теплорода от тела B к телу A , от холодильника к нагревателю, как

* Можно было бы удивиться, что тело B , будучи при той же температуре, что и пар, может его ожидить; строго говоря, это, конечно, невозможно; но так как малейшая разность в температуре вызовет конденсацию, то этого достаточно, чтобы сохранить правильность наших рассуждений. (...)

первоначальное состояние было бы восстановлено. Можно было бы возобновить подобную операцию и действовать так и далее. Это было бы не только вечным движением, но и беспредельным созданием движущей силы без затрат теплорода или каких-либо других агентов. Подобное создание совершенно противоречит общепринятым идеям, законам механики и здравой физике. Оно недопустимо*. Необходимо заключить, что *максимум движущей силы, получаемый употреблением пара, есть также максимум движущей силы, получаемой любым средством*. Мы дадим, кроме того, скоро второе, более точное доказательство этой теоремы. Предыдущее следует рассматривать как предварительное рассуждение.

Справедливо задать нам по поводу выведенного результата следующий вопрос: какой смысл имеет слово «максимум»? Чем можно обнаружить, что максимум достигнут? Как мы узнаем, что пар употреблен самым выгодным образом для развития движущей силы?

Всякое восстановление равновесия теплорода может быть причиной возникновения движущей силы, поэтому всякое восстановление равновесия, происходящее без образования этой силы, можно считать за настоящую потерю: отсюда, немного подумав, увидим, что во всякое изменение температуры, происходящее не от изменения объема тел, не может быть ничем иным, как бесполезным восстановлением равновесия теплорода**. Отсюда необходимое условие максимума будет: *в телах, употребляемых для развития движущей силы тепла, не должно быть ни одного изменения температуры, происходящего не от изменения объема*.

Обратно: всякий раз, когда это условие будет выполнено, максимум будет достигнут.

Этот принцип никогда не следует терять из виду при конструкции тепловых машин; это основное условие. Если его нельзя выполнить точно, то следует как можно меньше удаляться от него.

Всякое изменение температуры, обязанное не изменению объема или химическим действиям (которые мы здесь впрямь исклю-

* Могут здесь спросить: если доказана невозможность *perpetuum mobile* для чисто механических действий, то имеет ли это место при употреблении тепла или электричества; но разве возможно для явления тепла и электричества придумать иную причину, кроме какого-либо движения тел, и разве эти движения не должны подчиняться законам механики? Кроме того, разве неизвестно, что все попытки какими бы то ни было методами осуществить *perpetuum mobile* остались бесплодными; что никогда не удастся получить настоящий *perpetuum mobile*, т. е. движение, которое продолжается вечно, без изменения употребляемых тел?, (...)

** Мы здесь не предполагаем никаких химических действий между телами, взятыми для получения движущей силы теплоты. Химическое действие, происходящее в топке, есть в некотором роде предварительное действие, предназначенное не для непосредственного получения движущей силы, но для нарушения равновесия теплорода, для создания разности температур, которая уже затем дает возникновение движущей силы.

чаем), обязательно происходит от непосредственного перехода теплорода от более или менее нагретого тела к более холодному. Этот переход имеет главным образом место при соприкосновении тел с различной температурой; такие соприкосновения должны быть уменьшены насколько возможно. Конечно, они не могут быть исключены совершенно; но, по крайней мере, следует стремиться к тому, чтобы соприкасающиеся тела мало разнились друг от друга по температуре.

В нашем предыдущем рассуждении, употребляя теплород тела A для образования пара, мы полагали, что пар образуется при температуре самого тела A . Таким образом, соприкосновение имелось только между телами с одинаковой температурой; изменения температуры, происшедшие затем с паром, были обязаны расширению, т. е. изменению объема; наконец, конденсация производилась также без соприкосновения тел с различной температурой. Она происходила при приложении постоянного давления к пару, приведенному в соприкосновение с телом той же температуры, что и пар. Условия максимума выполнены. На самом деле явления не могут точно происходить так, как мы это предполагали. Чтобы обусловить переход теплорода от одного тела к другому, первое из них должно иметь более высокую температуру; но разность температур можно взять сколь угодно малой; в теории ее можно считать за нуль без того, чтобы рассуждения потеряли в точности.

Против нашего доказательства можно привести более серьезное возражение, а именно.

Когда мы отнимали тепло от тела A , чтобы получить пар, и затем конденсировали пар, присоединяя к телу B , то вода, служившая для его образования и первоначально бывшая при температуре тела A , в конце операции будет находиться при температуре тела B ; она охладится. Если мы хотим возобновить операцию, подобную первой, получить новое количество движущей силы с тем же прибором и с тем же паром, то нужно сперва восстановить первоначальное состояние, воде нужно придать ту температуру, которую она имела сначала. Это можно безусловно сделать, приводя ее прямо в соприкосновение с телом A , но тогда будет соприкосновение между телами с различной температурой и потеря движущей силы*: станет невозможным провести обрат-

* Эта потеря встречается во всех паровых машинах; в самом деле, вода, вводимая в котел, всегда холоднее находящейся там воды; между ними происходит бесполезное восстановление равновесия теплорода. Легко а posteriori убедиться, что это выравнивание действительно представляет потерю в движущей силе, если принять во внимание, что воду, подаваемую в котел, можно сначала согреть, употребляя ее как воду для конденсации пара в маленькой побочной машине, питаемой паром из того же котла, что и большая, и имеющей в холодильнике температуру, среднюю между температурой котла и главного холодильника.

Работа, производимая малой машиной, не вызывает никакой затраты тепла, так как все употребленное тепло возвращается в котел с водой из холодильника.

ную операцию, т. е. вернуть телу A теплород, употребленный для повышения температуры жидкости.

Эту трудность можно уничтожить, полагая разность температур между телами A и B бесконечно малой; количество теплоты, необходимое для приведения жидкости к ее начальной температуре, будет также бесконечно малым, и им можно будет пренебречь по сравнению с теплотой, нужной для образования пара, — величиной всегда конечной.

Заключение, выведенное для случая бесконечно малой разности температур между двумя телами, может быть легко распространено на общий случай. В самом деле, если требуется получить движущую силу от переноса теплорода от тела A к телу Z , причем температура последнего сильно отличается от температуры первого тела, то следует представить себе ряд тел B, C, D и т. д. с температурами, средними между температурами тел A и Z и выбранными таким образом, что разности от A до B , от B до C и т. д. все бесконечно малы. Теплород, взятый от A , дойдет до Z только пройдя через тела B, C, D и т. д. и разлив при каждом из своих переходов максимум движущей силы. Обратные операции также будут все возможны, и рассуждения с. 331 станут точно приложимы.

После установленных выше положений можно с достаточным основанием сравнить движущую силу тепла с силой падающей воды: обе имеют максимум, который нельзя превзойти, какая бы ни была в одном случае машина для использования действия воды, и в другом — вещество, употребленное для развития силы тепла. Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды; движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать и что мы на самом деле и будем называть высотой падения*, т. е. от разности температур тел, между которыми происходит обмен теплорода. При падении воды движущая сила строго пропорциональна разности уровней в верхнем и нижнем резервуарах. При падении теплорода движущая сила без сомнения возрастает с разностью температур между горячим и холодным телами; но мы не знаем, пропорциональна ли она этой разности. Мы не знаем, например, образует ли падение теплорода от 100 до 50 °C больше или меньше движущей силы, чем падение того же самого теплорода от 50 до 0 °C. Этот вопрос мы предлагаем разобрать несколько ниже.

Здесь мы дадим второе доказательство основного положения, выведенного на с. 332, и выскажем его в более общем виде, чем это было сделано до сих пор.

Когда газообразная жидкость быстро сжижается, то ее температура повышается; наоборот, она понижается при быстром раз-

* Так как предмет, о котором здесь идет речь, совершенно нов, то мы вынуждены употреблять выражения, еще не принятые и, может быть, не обладающие всей желаемой ясностью.

режении. Это одно из наиболее хорошо установленных следствий опыта; мы его возьмем в основу нашего доказательства*.

Если температура газа повысилась благодаря сжатию и мы хотим привести ее к первоначальному значению, не производя новых изменений объема, то надо отнять у газа теплород. Это же количество теплорода можно было бы отнять у газа во время самого сжатия так, чтобы температура газа оставалась все время постоянной.

Разрежая газ, можно уничтожить понижение его температуры, подводя к нему определенное количество теплорода. Мы будем называть теплород, употребленный в тех случаях, когда он не производит никакого изменения температуры, теплородом от изменения объема. Это выражение не значит, что теплород принадлежит объему, он принадлежит ему не более, чем принадлежит давлению; его также можно было бы назвать теплородом от изменения давления. Мы не знаем, какому закону он следует в зависимости от изменения объема; возможно, что его количество меняется с природой газа, с его плотностью, с его температурой. Опыт нам ничего не дал относительно этого; опыт дал только, что теплород развивается в более или менее значительных количествах при сжатии упругих жидкостей.

Сделав это предварительное замечание, вообразим упругую жидкость, например атмосферный воздух, заключенный в цилиндрический сосуд $abcd$ [рис. 79], закрытый подвижной диафрагмой или поршнем cd ; кроме того, предположим так же, что имеется два тела A и B , поддерживаемые при постоянной температуре, причем A при более высокой, чем B ; затем вообразим следующий ряд операций⁶.

1. Тело A приводится в соприкосновение с воздухом, заключенным в сосуде $abcd$, или со стенкой сосуда, которая, мы предполагаем, легко пропускает теплород. Благодаря этому соприкосновению воздух находится при температуре тела A ; cd — положение поршня в данный момент.

2. Поршень непрерывно поднимается и принимает положение ef . Все время имеет место контакт между телом A и воздухом, находящимся при постоянной температуре во время разрежения.

* Опыты, доказывающие наилучшим образом изменение температуры газа со сжатием или расширением, суть следующие:

1. Падение термометра, помещенного в колокол воздушного насоса, в котором производится разрежение. Это понижение очень заметно на термометре Бреге, оно может превысить 40 или 50 °С. Туман, получающийся в этом случае, кажется, происходит от сгущения пара благодаря охлаждению воздуха.

2. Воспламенение трута в так называемых пневматических огнивах, представляющих собой, как известно, маленькие цилиндры с поршнем, где воздух подвергается быстрому сжатию.

3. Падение термометра, помещенного в сосуд, из которого первоначально сжатый воздух выпускается через кран.

4. Результаты опытов над скоростью звука. Лаплас показал, что для точного согласования его результатов с теорией и вычислениями следует допустить нагревание воздуха при внезапном сжатии. (...)

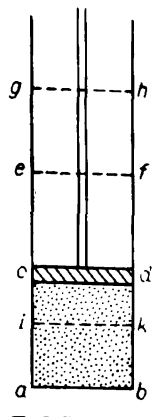


Рис. 79

Тело A дает теплород, необходимый для поддержания постоянной температуры.

3. Тело A удалено, и воздух больше не находится в соприкосновении с телом, способным снабжать его теплородом; поршень же продолжает свое движение и переходит из положения ef в положение gh . Воздух разрежается, не получая теплорода, и его температура падает. Предположим, что она падает до тех пор, пока не достигнет температуры тела B ; в этот момент поршень останавливается и занимает положение gh .

4. Воздух приведен в тепловой контакт с телом B ; он сжимается движением поршня, который переходит из положения gh в положение cd . Но воздух остается при постоянной температуре благодаря контакту с телом B , которому он отдает свой теплород.

5. Тело B удалено, сжатие воздуха продолжается; воздух, будучи изолирован, повышает свою температуру. Сжатие продолжается до тех пор, пока воздух не достигнет температуры тела A . Поршень при этом переходит из положения cd в положение ik .

6. Воздух приведен в соприкосновение с телом A ; поршень возвращается из положения ik в положение ef ; температура остается неизменной.

7. Период, описанный в п. 3, повторяется, затем следуют п. 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 и т. д.

В различных положениях поршень испытывает давления более или менее значительные со стороны воздуха, находящегося в цилиндре; упругая сила воздуха меняется как от изменения объема, так и от изменения температуры, но необходимо заметить, что при равных объемах, т. е. для подобных положений поршня, при разрежении температура будет более высокой, чем при сжатии. Поэтому в первом случае упругая сила воздуха будет больше, а отсюда движущая сила, произведенная движением от расширения, будет больше, чем сила, нужная для сжатия. Таким образом, получится излишек движущей силы, излишек, который можно на что-нибудь употребить. Воздух послужит нам тепловой машиной; мы использовали его даже наиболее выгодным образом, так как не происходило ни одного бесполезного восстановления равновесия теплорода.

Все операции, здесь описанные, могут быть проведены как в одном направлении, так и в обратном. Пусть после шестого периода, т. е. когда поршень придет в положение ef , его заставят вернуться в положение ik , и в то же время воздух поддерживается в соприкосновении с телом A . Теплород, отданный этим телом за шестой период, возвращается к источнику, т. е. к телу A , и все тела возвращаются в то состояние, в каком они находились в конце пятого периода. Если теперь убрать тело A и заставить поршень перейти от положения ik к cd , то тем-

пература воздуха опустится на столько градусов, на сколько она повысилась за пятый период, и станет равной температуре тела *B*. Очевидно, можно продолжать ряд операций, обратных описанным выше: достаточно каждый раз исходить из прежних условий и для каждого периода выполнять движение разрежения вместо движения сжатия, и наоборот.

Результатом первых операций было получение определенного количества движущей силы и перенос теплорода от тела *A* к телу *B*. Результатом обратных операций будет затрата полученной движущей силы и возвращение теплорода от тела *B* к телу *A*: обе операции уничтожают друг друга. (...)

Невозможность заставить теплород развить большее количество движущей силы, чем мы получили нашей первой серией операций, теперь легко доказать. Она будет доказана рассуждениями, совершенно подобными рассуждениям на с. 333. Они здесь даже будут иметь большую точность: воздух, которым мы пользуемся для получения движущей силы, приводится в конце каждого цикла операций точно к прежнему состоянию, в то время как это было не совсем так для водяного пара, что и было отмечено*.

Вы выбрали атмосферный воздух как средство для развития движущей силы тепла; очевидно, рассуждения были бы прежние для всякого другого газообразного вещества и даже для всех других тел, способных менять температуру благодаря сжатию и расширению, что охватывает все тела природы или по крайней мере все те, которые способны развивать движущую силу тепла. Таким образом, мы пришли к следующему выводу.

Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество определяется исключительно температурами тел, между которыми в конечном счете производится перенос теплорода.

Здесь предполагается, что каждый из методов получения движущей силы достигает полного совершенства, на которое он способен. Это условие, как мы заметили выше, будет выполнено, если в телах не будет происходить ни одного изменения температуры, обусловленного не изменением объема, или, что то же, только иначе выраженное, нигде не будет сопряжения между телами с заметной разностью температур. (...)

* В наших доказательствах мы полагали, что если тело, испытав любые изменения и ряд превращений, возвращается в прежнее положение относительно плотности, температуры и агрегатного состояния, то оно будет обладать тем же количеством теплоты, какое имело первоначально, т. е., другими словами, поглощаемые и развиваемые при различных превращениях количества теплоты взаимно компенсируются. Это положение никогда не подвергалось сомнению; оно было сначала принято без рассуждений и затем подтверждено многочисленными калориметрическими измерениями.

Отрицать это — значит разрушить всю теорию тепла, основывающуюся на этом положении. Впрочем, заметим мимоходом, основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории⁷.

Перевод с французского работы С. Карно выполнен С. Ф. Фришем. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб.//Под ред. А. К. Тимирязева. М.—Л., 1934, в котором дан ее полный перевод. Название работы в оригинале: *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.*

- ¹ Под термином «движущая сила» Карно понимает то, что в настоящее время принято называть работой, что следует из определения этого понятия, данного в примечании.
- ² Это ошибочное с современной точки зрения утверждение было очевидным в старой теории тепла, в рамках которой полагалось, что при всех тепловых процессах количество теплоты во взаимодействующих телах остается постоянным, что и приводит к взгляду на теплоту как на особое неуничтожимое вещество — теплород. Вторая же часть предложения есть ясная и точная формулировка основной идеи, последовательно проведенной через все сочинение и в той или иной формулировке лежащей в основе второго начала термодинамики.
- ³ Далее по существу формулируется утверждение о невозможности существования вечного двигателя второго рода. Следует отметить, что Карно в своих рассуждениях подразумевает периодически действующую машину.
- ⁴ Здесь идет речь о принципе работы холодильной машины.
- ⁵ «Упругими» жидкостями раньше называли газы и пары; их отличали от обычных жидкостей, характеризующихся ничтожной сжимаемостью.
- ⁶ Далее следует описание обратимого кругового цикла Карно, широко используемого при рассмотрении задач термодинамики и в наши дни.
- ⁷ Это примечание Карно свидетельствует о том, что уже при подготовке этого сочинения он испытывал сомнения в правильности теории теплорода.

Литература

- [1] Современное комментирование издание сочинения Карно: *Réflexions sur la puissance motrice du feu. Ed. critique par R. Fox. Paris, 1978.*
- [2] Sadi Carnot, *biographie et manuscrit. Paris, 1927.*
- [3] Кошманов В. В. Карно, Клапейрон, Клаузиус. М., 1985.

Голин Г. М., Филонович С. Р.

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3