



У. Томсон (Кельвин)

1824—1907

Об абсолютной шкале температур и втором начале термодинамики

Дальнейшее развитие промышленности в середине XIX в., имевшее в своей основе использование тепловых машин, неизбежно должно было привести к активизации и теоретических, и экспериментальных исследований тепловых машин. В течение десяти лет основополагающая работа С. Карно находилась в забвении, из которого ее извлек французский физик и инженер Б. Клапейрон. В 1834 г. он опубликовал работу, в которой облек идеи Карно в математическую форму, дополнив их результатами собственных исследований. Появление работы Клапейрона стимулировало разработку проблем термодинамики другими учеными. Одним из важнейших шагов на пути к построению здания классической термодинамики была идея английского физика У. Томсона о возможности построения абсолютной температурной шкалы.

Уильям Томсон родился 26 июня 1824 г. в Белфасте в семье профессора инженерии. Когда мальчику было семь лет, семья переехала в Глазго, где отец Уильяма получил кафедру математики в университете. Томсон рано потерял мать, и его воспитанием, как и воспитанием старшего брата, занимался отец, пользовавшийся у мальчиков огромным уважением.

Лекции отца в университете Уильям начал посещать уже в восемь лет, а в десять он уже был полноправным студентом. Закончив обучение в Глазго, семнадцатилетний Томсон поступил в Кембриджский университет, где специализировался по математике. После выпуска из Кембриджа по совету отца Уильям отправляется в Париж для стажировки в лаборатории известного экспериментатора В. Реньо, который проводил систематические исследования в области теплоты.

Тематика работ Реньо совпадала с интересами Томсона — еще во время учебы в Англии он под влиянием работ Фурье занялся исследованием процессов распространения тепла. Внимание Томсона привлекала также аналогия между описанием

электростатических и тепловых явлений. Этот интерес к термо- и электродинамике ученый сохранял в течение всей жизни.

После возвращения из Франции Уильям занимает кафедру натуральной философии (физики) в университете Глазго. Будучи блестящим теоретиком, Томсон в то же время много занимался экспериментальной физикой. По примеру Реньо он создал при кафедре лабораторию, в которой велась как учебная, так и исследовательская работа. С университетом Глазго связана практически вся творческая жизнь Томсона: он занимал кафедру физики в течение пятидесяти трех лет, а в последние годы жизни был президентом университета.

Научные интересы Томсона удивительно разнообразны. Так, стажирясь в Париже, он разработал метод решения задач электростатики, получивший название метода «зеркальных изображений» (1846). Там же Томсон по работе Клапейрона ознакомился с теорией Карно, что впоследствии (1848) привело его к идее об абсолютной термодинамической шкале температур. В 1851 г. независимо от Клаузиуса Томсон сформулировал второе начало термодинамики. На основе своих исследований по термодинамике Томсон вместе с Дж. Джоулем установил (1853—1854) изменение температуры газа при его дросселировании (эффект Джоуля—Томсона). В 1856 г. Томсон открыл третий термодинамический эффект (первые два — возникновение термо-ЭДС и выделение теплоты Пельтье), состоявший в выделении так называемой «теплоты Томсона» при протекании тока по проводнику, характеризующемуся ненулевым градиентом температуры. Томсону принадлежит и построение последовательной теории термоэлектрических явлений.

Томсон внес большой вклад в развитие практических применений электричества. Он был главным научным консультантом при прокладке первых трансатлантических кабелей, обеспечивших устойчивую телеграфную связь между двумя континентами. За участие в прокладке трансатлантического кабеля Томсон был возведен в дворянское достоинство (1865). В деле прокладки кабеля роль Томсона не ограничивалась консультациями. В связи с проблемой распространения электрических сигналов он рассмотрел процесс электромагнитных колебаний в контуре и вывел формулу для периода собственных колебаний, названную его именем. Кроме того, Томсон сконструировал целый ряд точных электрических приборов («кабельный» гальванометр, квадрантный электрометр, электростатический вольтметр и др.). Работы по прокладке трансатлантического кабеля пробудили в Томсоне интерес к проблемам морской навигации. Следствием этого интереса стало создание эхолота непрерывного действия, мареографа, принципиально усовершенствование морского компаса. Об авторитете Томсона и уважении к нему свидетельствуют слова одного морского офицера: «Каждый моряк должен молиться на него ежедневно!»

С 60-х годов Томсон начал разрабатывать теорию вихревых

атомов. Это направление исследований Томсона было связано с его общей методологической установкой — стремлением объяснить все физические явления механическими причинами. Томсоном была разработана вихревая теория светоносного эфира, которую Дж. Гиббс считал достойной соперницей электромагнитной теории света. В целом работы Томсона на эту тему явились как бы завершением попыток построить законченную механическую картину мира.

Томсон пользовался огромным авторитетом среди ученых всего мира. Он был членом многих научных академий и обществ (в том числе Петербургской АН), избирался президентом Лондонского Королевского общества, удостоивался многих наград. Ученый умер 17 декабря 1907 г.

На первом этапе исследований по термодинамике Томсон колебался в выборе точки зрения на природу теплоты. Поначалу он придерживался традиционной теории теплорода, и его работа (1848), в которой предложен принцип построения абсолютной шкалы температур, основана на этой теории. Позднее под влиянием исследований Джоуля Томсон перешел на позиции кинетической теории теплоты. Заметим, однако, что подход к построению термодинамической шкалы температур, предложенный Томсоном, оказался приемлемым и при новой точке зрения на природу тепла.

Важную роль в развитии учения о теплоте сыграла формулировка второго начала термодинамики как невозможности вечного двигателя второго рода, данная Томсоном. Стимулом для выяснения смысла и условий применимости этого закона послужила идея ученого о неизбежности «тепловой смерти» Вселенной (1852), ошибочность которой была убедительно продемонстрирована Л. Больцманом.

Об абсолютной термометрической шкале, основанной на теории Карно о движущей силе тепла и рассчитанной из наблюдений Реньо¹

Определение температуры давно признано в физической науке проблемой величайшей важности. Соответственно она была предметом наиболее пристального внимания и особенно в последние годы — очень тщательных и утонченных экспериментальных исследований. В настоящее время мы обладаем настолько полным практическим решением этой проблемы, насколько это может быть желательно даже для наиболее точных изысканий. Однако теория термометрии еще весьма далека от столь удовлетворительного состояния. Принцип, которому должно следовать при конструировании термометрической шкалы, на первый взгляд,

может показаться очевидным, поскольку может представляться, что совершенный термометр должен показывать равные приращения теплоты, как соответствующие равным приростам температуры, оцениваемым по числу делений этой шкалы. Теперь, однако, по вариациям удельных теплот тел установлен как экспериментально доказанный тот факт, что термометрия [основанная] на этих условиях невозможна, и мы остались без какого-либо принципа, на котором можно было бы основать абсолютную термометрическую шкалу.

Следующий по важности момент в первичном установлении абсолютной термометрической шкалы независимо от свойств любых конкретных видов вещества состоит в выборе условной системы термометрии, по которой результаты наблюдений, выполненных различными наблюдателями в разных местах и условиях, можно было бы точно сравнивать. Эта цель в весьма полной мере достигается с помощью термометров, устроенных и градуированных в соответствии с ясно определенными методами, освоенными лучшими приборостроителями наших дней, когда при интерпретации показаний термометров путем, допускающим сравнение, следуют ранее строго определенным (в особенности Реньо) экспериментальным процедурам. Конкретным видом термометра, в наименьшей степени подверженного неопределенным отклонениям любого типа, является термометр, который основан на расширении воздуха, и он поэтому повсеместно принят как эталон для сравнения термометров всех конструкций. Отсюда шкала, которая используется в настоящее время для оценки температуры, — это шкала воздушного термометра; и в точных исследованиях всегда заботятся о сведении к этой шкале показаний реально применяемого прибора, каковы бы ни были его конкретная конструкция и градуировка.

Принцип, согласно которому градуируется шкала воздушного термометра, состоит попросту в том, что равные абсолютные приращения объема массы воздуха или газа при постоянном давлении в приборе будут показывать по шкале равные разности чисел. Длина «градуса» определяется при этом путем приписывания определенного числа интервалу между точками замерзания и кипения. Реньо обнаружил, что различные термометры, построенные с использованием воздуха при разных давлениях или иных газов, дают показания настолько близкие, что различия оказываются неощутимыми*, если только не используются определенные газы, такие, как сернистая кислота, которые приближаются к физическому состоянию насыщенного пара. Это замечательное обстоятельство значительно увеличивает практическую

* Regnault, Relation des Expériences, etc. Fouth Memoir, 1 st part. Различия, как замечает Реньо, должны были бы быть более ощутимые, если бы градуировка выполнялась на основе предположения, что коэффициенты расширения различных газов равны, вместо того чтобы основываться на принципе, изложенном в тексте, согласно которому точки замерзания и кипения определяются экспериментально для каждого термометра.

ценность воздушного термометра. Тем не менее строгий стандарт может быть введен лишь путем выбора в качестве термометрического вещества определенного газа при фиксированном давлении. И хотя мы имеем точный принцип создания определенной системы для оценки температуры, все же, поскольку здесь существенна ссылка на конкретное тело как эталонное термометрическое вещество, мы не можем считать, что получили абсолютную шкалу, и, строго говоря, может рассматривать эту реально принятую шкалу лишь как условное множество оцифрованных точек отсчета, достаточно близкое к требованиям термометрии.

Поэтому при современном состоянии физической науки возникает исключительно интересный вопрос: существует ли какой-либо принцип, на котором может быть основана абсолютная термометрическая шкала?

Мне представляется, что теория Карно о движущей силе тепла позволяет нам дать на него утвердительный ответ.

Связь между движущей силой и теплом, как установлено Карно, состоит в том, что количества теплоты и интервалы температур входят как единственные элементы в выражение для механического действия, которое может быть получено посредством теплоты. Поскольку мы независимо располагаем определенной системой для измерения количеств теплоты, нам представляется и мера для интервалов, в соответствии с которой могут оцениваться абсолютные разности температур. Дабы сделать это более понятным, несколько слов следует сказать в пояснение теории Карно; но за полным изложением этого наиболее значимого вклада в физическую науку читатель отсылается к любой из работ, упоминавшихся выше (оригинальному сочинению Карно или статье Клапейрона об этом же предмете)².

При настоящем состоянии науки неизвестно действие, посредством которого теплота могла бы поглощаться либо без повышения температуры вещества, либо без превращения в скрытую теплоту и произведения некоторого изменения физического состояния тела, в котором она поглощается. Превращение теплоты (или caloric) в механическое действие, вероятно, невозможно* или, во всяком случае, не обнаружено³. В реальных машинах для получения механического действия посредством теплоты мы должны искать источник силы не в каком-либо поглощении и превращении, но единственно в передаче теплоты. Так Карно, отталкиваясь от общепринятых физических принципов, показы-

* Это мнение, по-видимому почти без исключения, принималось теми, кто писал об этом предмете. Тем не менее противоположное мнение защищает м-р Джоуль из Манчестера. Некоторые весьма замечательные открытия, которые он сделал в отношении генерации теплоты посредством трения в жидкостях, находящихся в движении, и некоторые известные эксперименты с магнетоэлектрическими машинами по видимости указывают на реальное превращение механического действия в теплоту. Тем не менее не представлено никаких экспериментов, в которых демонстрировалось бы обратное действие. Но следует признать, что многое из того, что относится к этим фундаментальным вопросам натуральной философии, еще окружено тайной.

вает, что механическое действие должно получаться именно благодаря *опусканию* теплоты от горячего тела к холодному через среду машины (например, паровой или воздушной); и обратно: он доказывает, что то же количество теплоты может быть *поднято* от холодного тела к горячему (машина в этом случае *работает в обратном направлении*) при затрате разного количества работающей силы (*labouring force*), точно так же как механическое действие может быть получено при течении воды вниз в водяном колесе или как в работающем насосе вода может подниматься на более высокий уровень. Количество механического действия, которое можно получить при передаче данного количества теплоты через какую-либо среду машины, в которой достигается совершенная экономия, будет зависеть, как показывает Карно, не от конкретной природы вещества, используемого в качестве среды для передачи теплоты в машине, но только от разности температур двух тел, между которыми теплота передается.

Карно детально исследовал идеальную конструкцию воздушной и паровой машин, при которой, кроме того что удовлетворено условие совершенной экономии, машина устроена так, что в заключение полного цикла используемое вещество (в одном случае — воздух, а в другом — вода) приводится в то же физическое состояние, в каком оно было в начале. Таким образом он показывает, на каких началах, доступных экспериментальному определению, либо со ссылкой на воздух, либо на жидкость и ее пар, может быть установлена абсолютная величина механического действия, обусловленного передачей единицы теплоты от горячего тела холодному при любом интервале термометрической шкалы. В статье м-ра Клапейрона представлены различные экспериментальные данные, по общему признанию очень неполные, и из них в соответствии с формулами Карно для различных частей шкалы рассчитаны величины механического действия, вызванного опусканием единицы теплоты на один градус воздушного термометра. Полученные результаты весьма определенно показывают, что величина, которую мы с большим основанием можем назвать градусом (оцениваемым по механическому действию, полученному при опускании единицы количества теплоты на эту величину) воздушного термометра, зависит от того, в какой части шкалы она берется, причем для высоких температур она меньше, чем для низких*.

Характерное свойство той шкалы, которую я теперь предлагаю, состоит в том, что все градусы имеют одну и ту же вели-

* Это то, что мы могли предвидеть, поскольку считаем, что бесконечный холод должен соответствовать конечному числу градусов воздушного термометра ниже нуля. Если мы доведем строгий принцип градуировки, установленный выше, достаточно далеко, то достигнем точки, соответствующей объему воздуха, уменьшенному до нуля, что будет отмечено на шкале как -273° ($-100/0,366$, если $0,366$ есть коэффициент расширения). Поэтому -273° воздушного термометра — это точка, которой не может достигнуть никакая конечная температура, сколь бы низкой она ни была.

чину, т. е. единица теплоты, опускающаяся от тела A с температурой T по этой шкале к телу B с температурой $(T-1)$, должна создавать одно и то же механическое действие, каким бы ни было число T . Такая шкала справедливо может быть названа абсолютной, поскольку ее характеристика совершенно не зависит от физических свойств какого-либо конкретного вещества.

Для того чтобы сравнить эту шкалу со шкалой воздушного термометра, должны быть известны *величины* градусов воздушного термометра (соответствующие принципу оценки, установленному выше). Тогда выражение Карно, полученное из рассмотрения его идеальной паровой машины, позволяет нам рассчитать эти величины, если скрытая теплота какого-либо данного объема и давления насыщенных паров при любой температуре определены экспериментально. Определение этих величин составляет главную цель огромной работы Реньо, о которой уже упоминалось, но в настоящее время его исследования еще не завершены. В первой части, которая пока только и опубликована, были определены скрытые теплоты данных весов и давление насыщенных паров для всех температур между 0 и 230° (по стоградусной шкале воздушного термометра). В дополнение необходимо было бы знать плотность насыщенных паров при различных температурах, что позволило бы определить скрытую теплоту любого данного объема при любой температуре. М-р Реньо сообщил о своем намерении начать подобные исследования; но, пока эти результаты неизвестны, у нас нет другого пути дополнения данных для решения настоящей задачи, кроме оценки плотности насыщенного пара при любой температуре (причем соответствующие давления известны по уже опубликованным исследованиям Реньо) в соответствии с приближенными законами сжимаемости и расширения (законы Мариотта и Гей-Люссака или Бойля и Дальтона). В пределах естественных температур в обычном климате плотность насыщенного пара уже измерена Реньо⁴ для проверки этих законов. Исходя из экспериментов, которые были выполнены Гей-Люссаком и др., мы имеем основание верить, что вплоть до температуры 100° значительных отклонений быть не может. Но наша оценка плотности насыщенного пара, основанная на этих законах, может быть сильно ошибочной при таких высоких температурах, как 230° . Следовательно, полностью удовлетворительный расчет предложенной шкалы не может быть проведен впредь до получения дополнительных экспериментальных данных. И все же с теми данными, которыми мы уже обладаем, можно привести приближенное сравнение новой шкалы со шкалой воздушного термометра, которое, по крайней мере между 0 и 100° , будет достаточно удовлетворительным.

Труд по выполнению необходимых расчетов для проведения сравнения предложенной шкалы и шкалы воздушного термометра в пределах от 0 до 230° последнего любезно взял на себя м-р Уильям Стил, до недавнего времени работавший в Глазго-

колледже, а теперь — в колледже Св. Петра и Кембридже. Его результаты были представлены Обществу в виде таблиц вместе с диаграммой, на которой сравнение двух шкал представлено графически. В первой таблице⁵ показаны величины механического действия, обусловленного опусканием единицы теплоты на последовательное число градусов воздушного термометра. Принятая единица теплоты — это количество [теплоты], необходимое для повышения температуры 1 кг воды от 0 до 1° воздушного термометра, а единица механического действия — это килограмм-метр, т. е. действие, совершаемое при поднятии 1 кг на высоту 1 м.

Механическое действие, выраженное в футо-фунтах, обусловленное единицей теплоты по стоградусной шкале, переходящей от тела при любой температуре, меньшей 230°, к телу с температурой 0°

Верхний предел температуры	Механическое действие	Верхний предел температуры	Механическое действие
1	4,960	20	96,656
2	9,906	30	143,058
3	14,838	40	188,223
4	19,756	50	232,185
5	24,661	60	274,975
6	29,553	70	316,644
7	34,431	80	357,271
8	39,296	90	396,935
9	44,148	100	435,695
10	48,987		

Во второй таблице⁶ представлены температуры по предложенной шкале, которые соответствуют различным градусам воздушного термометра от 0 до 230°. Условные точки, совпадающие на обеих шкалах — 0 и 100°.

Замечание. Если мы сложим вместе первые сто чисел, данные в первой таблице, то получим 135,7 для работы, обусловленной опусканием единицы теплоты от тела А при 100° к В при 0°. Далее, 79 таких единиц теплоты, согласно д-ру Блэку (его результаты очень ненамного поправлены Реньо), заставляют таять килограмм льда. Следовательно, если теплоту, необходимую для плавления фунта льда принять за единицу, а метр-фунт — за единицу механического действия, то работа, которая должна получаться при опускании единицы количества теплоты от 100 до 0°, составляет $79 \cdot 135,7$, или приблизительно 10 700. Это то же самое, что и 35 100 футо-фунтов, что чуть больше, чем работа двигателя 1 л. с. за 1 мин (33 000 футо-фунтов). Следовательно, если бы мы имели паровую машину в 1 л. с., работающую с совершенной экономией, с котлом при температуре 100° и конденсатором, поддерживаемым при температуре 0° путем непрерывного добавления льда, то за 1 мин должно было бы таять гораздо менее, чем фунт льда.

ЧАСТЬ I

Основные принципы теории движущей силы тепла

9. Вся теория движущей силы теплоты основывается на следующих двух положениях, обязанных своим происхождением первое — Джоулю, а второе — Карно и Клаузиусу.

Положение I (Джоуль). Во всех случаях, когда равные количества механического действия получаются каким бы то ни было способом исключительно за счет источника тепла или теряются при исключительно тепловых действиях, всегда уничтожаются или приобретаются равные количества теплоты.

Положение II (Карно и Клаузиус). Если какая-либо машина устроена таким образом, что при работе ее в противоположном направлении все механические и физические процессы в любой части ее движений превращаются в противоположные, то она производит точно такое же механическое действие, какое могла бы произвести за счет заданного количества теплоты любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника. (...)

12. Доказательство второго положения основывается на следующей аксиоме: *невозможно при помощи неодушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическое действие путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов**.

13. Для доказательства второго положения допустим, что существуют две термодинамические машины A и B , из которых B удовлетворяет условиям, указанным в формулировке второго предложения, и пусть, если возможно, A производит из заданного количества теплоты больше работы, чем B , когда их источники тепла и холодильники находятся при соответственно равных температурах. Тогда в силу полной *обратимости* всех совершаемых ею операций машина B могла бы работать в обратном направлении и могла бы возвращать своему источнику тепла некоторое количество теплоты за счет той работы, которую она при обратном своем действии получила бы из такого же количества теплоты. Если B заставить работать в обратном направлении и возмещать источнику тепла машины A (которую мы можем предположить соответственно приложенной к B) как раз столько теплоты, сколько было заимствовано из него в течение определенного периода действия машины A , то окажется, что затра-

* Если бы мы не признали эту аксиому действительной при всех температурах, нам пришлось бы допустить, что можно ввести в действие автоматическую машину и получать путем охлаждения моря или земли механическое действие в любом количестве, вплоть до исчерпания всей теплоты суши и моря или, в конце концов, всего материального мира.

чено на это было работы меньше, чем ее было получено от действия машины *A*. Таким образом, если подобные ряды прямых операций машины *A* и обратных — машины *B*, работающих либо поочередно, либо одновременно, будут продолжены, то результатом этого будет непрерывное получение работы без непрерывного извлечения теплоты из источника тепла. Согласно положению 1, отсюда следует, что при обратной работе машины *B* из холодильника должно забираться больше теплоты, чем ему передается при прямой работе машины *A*. Можно было бы поставить дело и таким образом, чтобы машина *A* тратила часть своей работы на приведение в обратное движение машины *B*, и всю эту установку можно было сконструировать в виде автоматически действующего аппарата. Итак, в этом случае от источника тепла не отнималось бы и ему не сообщалось бы никакой теплоты, а всем прочим окружающим телам и пространствам, за исключением холодильника, можно было бы, не вступая в противоречие с каким-либо принятым ранее условием, приписать температуру, равную температуре источника тепла, какова бы ни была последняя. Мы, следовательно, имели бы автоматически действующую машину, способную непрерывно извлекать теплоту тела, окруженного другими телами с более высокой температурой, и превращать эту теплоту в механическое действие. Но последнее противоречит нашей аксиоме, и поэтому мы приходим к заключению, что гипотеза, допускающая, будто машина *A* извлекает из равного количества теплоты, взятой из источника тепла, большее механическое действие, чем машина *B*, является ложной. Следовательно, при определенных температурах источника тепла и холодильника никакая машина не может извлечь из данного количества введенного в нее теплоты больше работы, чем машина, удовлетворяющая условиям обратимости, что и требовалось доказать. <...>

Комментарий

Сокращенный перевод с английского работы У. Томсона «Об абсолютной термометрической шкале...» выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: *On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's observations.* «Philosophical Magazine», 1848, Ser. 3, vol. 33, n222, p. 313—316. Сокращены лишь некоторые примечания Томсона. Перевод с английского работы У. Томсона «О динамической теории теплоты...» выполнен В. С. Гохманом. Орывки из нее воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб., М. — Л., 1934, с. 161—174. Название этой работы на языке оригинала: *On the Dynamical Theory of Heat, with numerical Results deduced from Mr. Joule's Equivalent of a thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam (1851).*

- ¹ В. Реньо проводил исследования термодинамических свойств различных веществ на протяжении нескольких десятилетий. Первый том издания, содержащего полученные им результаты, вышел в 1847 г., второй — в 1862 г., третий — в 1870 г.
 - ² Статья Клапейрона называлась «Мемуар о движущей силе огня».
 - ³ Эта фраза объясняется тем, что при подготовке данной работы Томсон еще не отказался окончательно от теории теплорода, хотя определенные сомнения относительно ее справедливости у него уже были (см. подстрочное примечание Томсона в тексте).
 - ⁴ В работе «Очерки по гигрометрии».
 - ⁵ Ниже приведен сокращенный вариант таблицы, на которую ссылается Томсон.
 - ⁶ Таблица, о которой говорит Томсон, в его опубликованной работе не приведена.
-

Литература

- [1] Собрание сочинений У. Томсона:
Thomson W. Mathematical and Physical Papers. Vols. 1—6. Cambridge, 1911.
- [2] *Thomson S. P. The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs. Vols. 1—2. London, 1901.*
- [3] Мак-Дональд Д. Фарадей, Максвелл и Кельвин. М., 1967.

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