

Карно, Клапейрон, Клаузиус

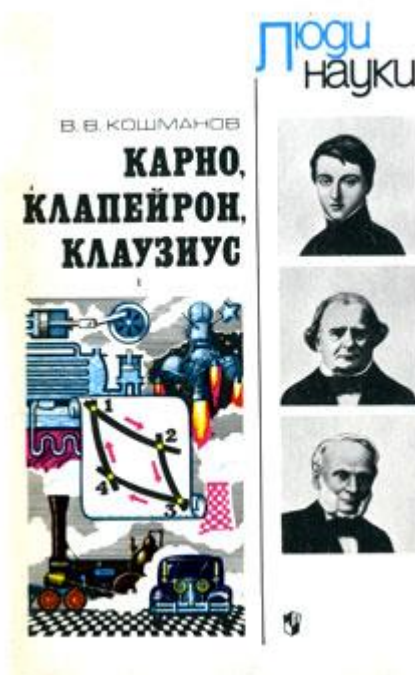
В книге изложены научно-биографические сведения о создателях термодинамики С. Карно, Б. Клапейроне и Р. Клаузиусе, дано краткое содержание их работ, относящихся к этому разделу науки. Книга предназначена для учащихся средних школ и для лиц, интересующихся историей физики.

- О книге
- Люди науки
- Введение
- Глава I. Исторический обзор исследований в области теплоты
 - Работа и теплота
 - Развитие взглядов на природу теплоты
 - Термометрия
 - Создание первых тепловых двигателей
- Глава II. Сади Карно - создатель термодинамики
 - Биографические сведения
 - "Размышления о движущей силе огня..."
 - Результаты дальнейших научных исследований
- Глава III. Клапейрон и его вклад в развитие термодинамики
 - Биографические сведения
 - "Размышления о движущей силе огня..."
 - Значение работ Клапейрона для становления и развития термодинамики
- Глава IV Клаузиус и становление термодинамики
 - От Клапейрона до Клаузиуса
 - Биографические сведения
 - Клаузиус и первое начало термодинамики
 - Клаузиус и второе начало термодинамики
- Глава V. Дальнейшие шаги термодинамики
 - "Тепловая смерть" вселенной
 - Энтропия и вероятность состояния
 - Применение термодинамических методов

Источник:

Кошманов В.В. 'Карно, Клапейрон, Клаузиус' - Москва: Просвещение, 1985 - с.95

О книге



Кошманов Василий Владимирович - Люди науки. Карно, Клапейрон, Клаузиус

ББК 22.317 К76

Рецензенты: кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой методики физики МОПИ им. Н. К. Крупской Л. П. Свитков; кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института истории естествознания и техники АН СССР О. А. Лежнева

Кошманов В. В.

К76 Карно, Клапейрон, Клаузиус: Кн. для учащихся.- М: Просвещение, 1985. - 96 с, ил. - (Люди науки).

В книге изложены научно-биографические сведения о создателях термодинамики С. Карно, Б. Клапейроне и Р. Клаузиусе, дано краткое содержание их работ, относящихся к этому разделу науки. Книга предназначена для учащихся средних школ и для лиц, интересующихся историей физики.

ББК 22.317 + 22.3г

530.1 + 53(09)

К4306020000-349 171-85

Издательство "Просвещение", 1985 г.

Заведующая редакцией Н. В. Хрусталь Редактор Е. В. Смольникова Младший редактор Л. С. Дмитриева Художественный редактор В. М. Прокофьев Технический редактор Г. В. Субочева Корректор Л. Н. Новожилова

ИБ № 8383

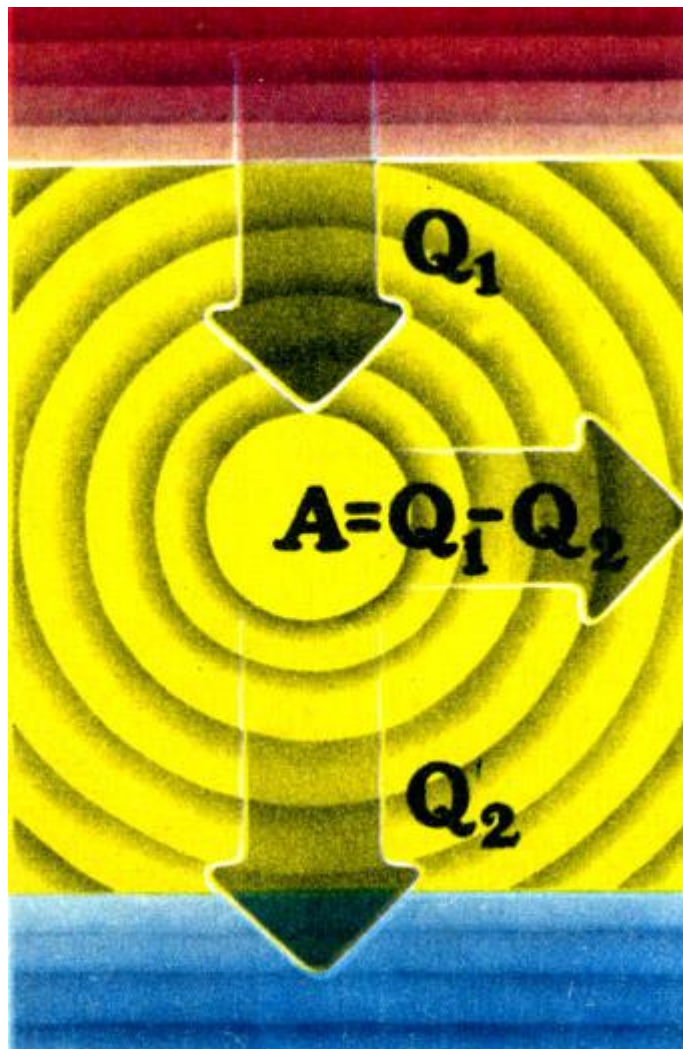
Сдано в набор 10.10.84. Подписано к печати 05.02.85. Формат 60x90 ¹/₁₆. Бум. офсетная № 2. Гарнит. школьная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6. Усл. кр.-отт. 6,56. Уч.-изд. л. 5,46. Тираж 100 000 экз. Заказ № 790. Цена 15 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Просвещение" Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

Люди науки

В книге рассказано о жизни и творчестве трех основателей термодинамики - С. Карно (1796 - 1832), Б. Клапейрона (1799 - 1864) и Р. Клаузиуса (1822 - 1888).



Термодинамика

С. Карно ввел понятия кругового и обратимого процессов, идеального цикла тепловых машин, заложил тем самым основы их теории. Показал преимущество применения в паровых машинах пара высокого давления и его многократного расширения, сформулировал принцип работы газовых тепловых машин. Пришел к понятию механического эквивалента теплоты.

Труд Карно получил широкую известность благодаря Б. Клапейрону, который придал математическую форму его идеям, первым оценив большое научное значение работы, содержащей фактически формулировку второго начала

термодинамики. Исходя из этих идей, Клапейрон впервые ввел в термодинамику графический метод - индикаторные диаграммы, вывел уравнение, устанавливающее связь между температурой плавления и кипения вещества и давлением, - уравнение Клапейрона - Клаузиуса.

Р. Клаузиус обосновал уравнение Клапейрона, сформулировал второе начало термодинамики, дал математическое выражение второго начала как в случае обратимых круговых процессов, так и необратимых, ввел понятие энтропии.

Введение

Известно, что тепловые машины вырабатывают примерно 80 - 85% электрической энергии, используемой человечеством. Кроме того, без тепловых машин совершенно невозможно представить современный транспорт - автомобили различных конструкций и марок, тепловозы, самолеты всех типов и двигатели космических аппаратов. Общим для всех тепловых машин является то, что в них совершается преобразование энергии сгорающего топлива в механическую, которая и создает силу тяги всего устройства.

Первым этапом на пути преобразования энергии топлива в механическую явилось создание паровой машины. Двигатели внутреннего сгорания появились спустя полтора столетия, а транспортные средства, оснащенные реактивными двигателями, заявили о себе лишь в последние десятилетия. Паровые машины в течение двух столетий не только выдержали конкуренцию со стороны водяных и ветряных двигателей, имеющих длительную историю применения, но и почти полностью вытеснили их. Широкое распространение паровых машин вызвано рядом конструктивных особенностей, отличающих их от двигателей, приводимых в движение силой падающей воды или ветра. Паровая машина может работать когда угодно и где угодно: она не зависит от капризов погоды и не нуждается в быстрых течениях рек. Не менее важен и тот факт, что даже первые паровые машины отличались компактностью, высокой для того времени мощностью и, что самое главное, широкими возможностями для усовершенствования. Правда, первый образец паровой машины - насос Севери - имел коэффициент полезного действия всего лишь 0,6%, но ученые и инженеры на

протяжении многих десятилетий не прекращали поиски путей его повышения. Однако добиться существенных успехов в этом направлении удалось только после того, как были поняты процессы перехода теплоты в работу, после того, как была раскрыта природа теплоты и завершено создание термодинамики.

Основы термодинамики были заложены французским военным инженером С. Карно. В своей книге "Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу", вышедшей в Париже в 1824 г., он дал инженерам и конструкторам тепловых двигателей ключ к пониманию физической сути тепловых процессов, которые осуществляются в этих двигателях. Не имея предшественников, Карно первым сумел, отвлекаясь от частных случаев, найти верный путь к решению проблемы повышения экономичности тепловых машин.

Следующий шаг в этом направлении был сделан соотечественником Карно, инженером Б. Клапейроном. Он развил идеи Карно, придав им доступную математическую форму, предварительно разработав графический метод изображения тепловых процессов. Именно в переложении Клапейрона работа Карно стала известна европейским физикам.

Дальнейшее развитие термодинамики связано с именами У. Томсона (лорда Кельвина) и Р. Клаузиуса. Клаузиус, изучив работы Карно, взял из них самое существенное и в общих чертах завершил построение термодинамики. Именно ему удалось математически оформить разрабатываемую им кинетическую теорию теплоты; им же сформулировано второе начало термодинамики, введено понятие энтропии. Дальнейшее развитие термодинамики было дано в работах Л. Больцмана, М. Планка и других ученых.

В первой главе предлагаемой книги дан исторический обзор научных достижений, так или иначе оказавших влияние на становление термодинамики как науки. Приведены сведения об эволюции представлений о природе теплоты, о создании и усовершенствовании паровой машины.

Вторая глава посвящена жизни и научной деятельности основателя термодинамики С. Карно. Здесь же изложены основные идеи его научных поисков. Третья и четвертая главы

построены по аналогии со второй и содержат сведения о жизни и научной деятельности в области термодинамики Клапейрона и Клаузиуса.

Следует отметить, что в литературе на русском языке не существует значительных исследований об ученых, представленных в данной работе, за некоторым исключением, касающимся С. Карно.

Автор понимает сложность принятых на себя обязанностей и ни в коей мере не считает, что его работа выполнена безукоризненно. Все замечания и пожелания автор примет с благодарностью.

Глава I. Исторический обзор исследований в области теплоты

Работа и теплота

Работа и теплота... Эти два процесса известны человечеству с глубокой древности. Работа представлялась как перемещение или поднятие тяжестей, и ничего необычного, таинственного в этом процессе не усматривалось. Иное дело - теплота. Теплота на ранней стадии развития человечества была неразрывно связана с огнем. Для первобытного человека огонь - это и защита от холода, и способ приготовления пищи, и освещение жилища, и способ охоты. Почитание огня далекими предками граничило с его обожествлением как наивысшего блага.

Открытие способа добывания огня человеку, вероятнее всего, подсказала природа. Удар молнии в дерево, трение деревьев друг о друга во время бури, удар камня о камень - все эти факты, порождающие огонь, подмечались, фиксировались в памяти и передавались из поколения в поколение. Добытый огонь необходимо было все время поддерживать, хранить от непогоды, что не всегда удавалось в связи с условиями жизни того времени. Поэтому вполне естественным представлялось найти способ получения огня, чтобы не зависеть от случая, не ждать молнии или бури.

Первые приспособления для добывания огня были основаны на трении двух кусков дерева (рис. 1), Устройств, облегчающих этот процесс, было много, но принципиально они

не отличались. При длительном трении кусков дерева происходило нагревание их до такой степени, что сухая трава или мелкие стружки, расположенные возле, воспламенялись. Когда это было сделано впервые, неизвестно. Важен сам факт: получать теплоту за счет совершения работы человек научился еще на заре цивилизации. "Практическое открытие превращения механического движения в теплоту так старо, - отмечал Ф. Энгельс, что от него можно было бы считать начало человеческой истории"¹. Далее, подчеркивая важность этого открытия, Энгельс пишет: "...только научившись добывать огонь с помощью трения, люди впервые заставили служить себе некоторую неорганическую силу природы"².

¹ (Маркс К., Энгельс Ф. Собр. соч., т. 20, с. 429-430)

² (Там же, с. 430)



Рис. 1. Первые приспособления для добывания огня были основаны на трении двух кусков дерева

Удивительным представляется тот факт, что обратный процесс, процесс превращения теплоты в механическую работу, не был известен нашим далеким предкам. Первые упоминания об обратном процессе связаны с именем древнегреческого ученого Герона Александрийского и относятся к 120 г. до н. э. Герон изобрел устройство, способное вращаться под действием пара, выходящего из него. Историками древности упоминается также изготовленное им приспособление, которое за счет расширения нагреваемого воздуха открывало двери храма, поднимало помосты и др. Но изобретение этих устройств не преследовало каких бы то ни было практических целей. Их предназначение было иным: египетские жрецы таким образом внушали народу веру в

чудеса. Потребовалось около 2000 лет, для того чтобы человечество осознало возможность и почувствовало необходимость осуществления обратного процесса и пришло к идее получения работы за счет теплоты. Чем же объяснить трудности в осуществлении обратного процесса? Причин этому много. Во-первых, если прямой процесс - получение теплоты за счет работы - человеку подсказала природа, то обратный процесс человек в явном виде в природе подсмотреть не мог. Во-вторых, если получение огня было жизненно необходимым, то получение энергии за счет теплоты для человека не представляло ценности. Даже в поздние годы человек не испытывал нужды в дополнительных источниках энергии, широко используя для своих нужд силу падающей воды, силу течения рек и силу ветра. На той ступени развития этого было достаточно. В-третьих, если понимание механических процессов не требовало глубокого проникновения в их суть, то с теплотой дело обстояло несколько иначе. Любопытно то, что теплота долгое время не воспринималась древними как источник энергии: теплое и холодное оценивались и воспринимались только физиологически.

Однако развитие общества, укрупнение производства, переход от кустарного ремесленничества к мануфактурам потребовали устройств, которые приводили бы в движение станки и машины. Природные силы не всегда выручали человека. Поиски нового источника энергии становятся актуальной задачей общества. Человечество начинает осознавать ту огромную силу, которая скрыта в теплоте. Однако найти способ практического овладения ею долгое время не удавалось.

Прежде чем использовать внутреннюю энергию, необходимо было разобраться в тепловых процессах, открыть законы, описывающие их. Необходимо было ввести количественные характеристики, описывающие тепловые процессы, составить представление о природе теплоты и затем приниматься за конструирование тепловых машин, преобразующих внутреннюю энергию в механическую. Лишь после того, как была создана термометрия, выработаны некоторые представления о природе теплоты, появилась возможность научного подхода к решению основной проблемы.

В последующем изложении будут кратко рассмотрены основные, этапы общего учения о теплоте, описаны первые

попытки превратить теплоту в работу. Исторический обзор весьма условно разбит на такие самостоятельные разделы, как термометрия, учение о природе теплоты и первые практические шаги по пути создания паровых машин. После ознакомления с предлагаемым материалом, изложенным хронологически, читатели смогут убедиться в том, что действительно долгое время, вплоть до создания кинетической теории теплоты (1850-е годы), отдельные направления, развиваясь, не всегда были обусловлены одно другим и только к первой половине XIX в. появилась возможность обобщить эти, казалось бы, разрозненные факты. Результатом этого обобщения явилось создание одного из важнейших разделов современной физики - термодинамики.

Развитие взглядов на природу теплоты

Несмотря на то, что на раннем этапе развития человечества теплота не представляла энергетической ценности, вопрос о природе теплоты не был безразличным для древних философов. Исследуя проблему строения материи, философы древности выдвигали в качестве первоосновы всего существующего гипотетические элементы - стихии. К стихиям они относили землю, воду, воздух и огонь. Одна из этих первооснов - огонь - была специально введена для объяснения тепловых явлений и процессов. Наиболее отчетливыми по этому поводу представляются рассуждения Платона, изложенные им в физическом трактате "Тимэй", написанном в середине IV в. до н. э. Платон не только ввел названия первооснов, но и предпринял первую попытку объяснить строение тел и их взаимопревращение. "Возьмем для начала хотя бы то, - пишет Платон, - что мы теперь называем водой: когда она сгущается, мы полагаем, что видим рождение камней и земли, когда же она растекается и разрежается, соответственно рождаются ветер и воздух, а последний, возгораясь, становится огнем; затем начинается обратный путь, так что огонь, сгустившись и угаснув, снова приходит к виду воздуха, а воздух опять собирается и сгущается в облака и тучи, из которых при дальнейшем уплотнении изливается вода, чтобы в свой черед дать начало земле и камням".

Для нас наиболее интересны в этой работе его рассуждения о природе теплоты, где он уже различает "материю пламени", "материю света" и "материю тепла". Таким образом, Платона

можно считать автором материальной теории теплоты, автором теории теплорода. Позднее ученые использовали его идеи и, несколько осовременив, продолжали развивать их в своих работах, не всегда ссылаясь на первоисточник. Но ничего нового, тем более оригинального, к уже существующему им добавить не удалось. Так продолжалось до XVII столетия.

На рубеже XVII - XVIII вв. вопрос о природе теплоты был вновь поставлен на повестку дня, в то время когда развивающаяся промышленность потребовала создания нового типа двигателя. Вновь была возрождена вещественная гипотеза теплоты - гипотеза теплорода, которая объясняла ряд известных явлений и процессов. Подкупали в ней наглядность и возможность проведения аналогии: течение теплорода предполагалось аналогичным течению жидкости. Более того, гипотеза теплорода давала возможность математического описания процессов, причем полученные выводы совпадали с фактами, установленными экспериментально. Так, с позиции теплорода ученым удалось объяснить процессы нагревания тел, их тепловое расширение, теплообмен, тепловое равновесие и др. Эта гипотеза получила поддержку таких ученых, как Бойль, Лавуазье, Лаплас, Фурье и др. Поэтому не удивительно, что гипотеза теплорода заняла ведущее место в ряду других гипотез о природе теплоты.

Наряду с вещественной гипотезой теплоты в древности также были заложены основы гипотезы, в соответствии с которой теплота представляет собой механическое движение некоторых частиц - первооснов, составляющих тело. Развитие общих представлений об окружающей природе одновременно способствовало развитию этой гипотезы, и, нужно отметить, она сумела не только выжить, но и со временем увеличить число своих сторонников.

Второе рождение гипотеза теплоты как движения микрочастиц, составляющих тело, получила в XVII в., в те же годы, что и гипотеза теплорода. Теплоту как движение малых частиц, из которых построены тела, объяснял Ф. Бэкон. Более подробно излагал подобное воззрение Р. Декарт. Представление о теплоте как результате движения мельчайших частиц, образующих тело, было поддержано такими известными учеными, как Ньютон, Гук, Гюйгенс и др. Попытка математически интерпретировать кинетическую теорию теплоты была впервые предпринята *Д. Бернулли* (1700

- 1782). В трактате "Гидродинамика", вышедшем в свет в 1738 г., он первым в истории физики пытается объяснить нагревание тел увеличением скорости движения частиц, из которых они состоят. Эти частицы, согласно Бернулли, двигаются с большими скоростями в разных направлениях, "Упругость воздуха повышается не только вследствие сгущения, - пишет он в своем трактате, - но и вследствие увеличения теплоты, ибо известно, что везде, где возрастает внутреннее движение частиц, теплота повышается". Это четкое утверждение автора долгое время не встречало поддержки. Активным сторонником гипотезы теплоты как механического движения "нечувствительных частиц", составляющих тело, был русский ученый *М. В. Ломоносов* (1711 - 1765). Свои идеи и примеры, подтверждающие высказанное им, Ломоносов обобщил в диссертации "Размышления о причине теплоты и холода", опубликованной в 1750 г. В этой работе ученый, ссылаясь на очевидные факты, рассуждает о механической природе теплоты. "Очень хорошо известно, - пишет Ломоносов, - что теплота возбуждается движением: от взаимного трения руки разогреваются, дерево загорается пламенем; при ударе кремня об огниво появляются искры; железо накаливается от проковывания частыми и сильными ударами, а если их прекратить, то теплота уменьшается и произведенный огонь в конце концов гаснет. Далее, восприняв теплоту, тела или превращаются в нечувствительные частицы и рассеиваются по воздуху, или распадаются в пепел, или в них настолько уменьшается сила сцепления, что они плавятся... Из всего этого совершенно очевидно, что достаточное основание теплоты заключалось в движении какой-то материи". Далее: "Мы считали, что никто... не будет теплоту, источник стольких изменений, приписывать материи спокойной, лишенной всякого движения, а следовательно, и двигательной силы".



Д. Бернулли



М. В. Ломоносов

Отстаивая механическую теорию теплоты, Ломоносов в заключительной части своей диссертации резко обрушивается на сторонников теории теплорода. Весьма любопытным и остроумным представляется логический ход рассуждений ученого: если расширение тел при нагревании объясняется как результат проникновения теплорода в поры нагреваемого тела, то почему же расширение всех тел при одной и той же степени нагревания различно? Могут возразить, продолжает полемизировать ученый, что значительное сцепление частиц препятствует расширению некоторых тел. Но ведь сталь

расширяется сильнее, чем железо, хотя тверже последнего. То же самое можно сказать о бронзе и меди. Не в пользу сторонников гипотезы теплорода и тот факт, что вода при нагревании сжимается¹. Аналогично ведет себя и чугун. "На основании всего изложенного выше, - заканчивает свою работу Ломоносов, - мы утверждаем, что нельзя приписывать теплоту тел сгущению какой-то тонкой, специально для этого предназначенной материи, но что теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи нагретого тела".

¹ (Это свойство воды проявляется при нагревании ее от 0 до 4°C)

Диссертация Ломоносова появилась в те годы, когда гипотеза теплорода была общепринята и почти никем не оспаривалась. И вполне понятна реакция ученого мира на появление этой работы. Академическое собрание, которое рассматривало диссертацию Ломоносова, весьма скептически отнеслось к идеям ученого. Не помогла даже веская аргументация в виде примеров. Опубликовать диссертацию удалось только после того, как Эйлер высоко оценил ее и дал блестящее заключение. Однако появление в печати работы Ломоносова вызвало поток резкой критики в адрес ученого. Но это не обескуражило его: он продолжает отстаивать свои взгляды на механическую теорию теплоты и более детально развивать выдвинутые им положения. Однако ни дальнейшие работы Ломоносова в этом направлении, ни старания Эйлера, который пропагандировал идеи русского ученого, не смогли поколебать уверенности, точнее, самоуверенности сторонников гипотезы теплорода.

Противников гипотезы теплоты как механического движения "нечувствительных частиц" можно понять. Ломоносов полностью отвергал гипотезу, выводы из которой хорошо согласовывались с экспериментальными результатами. Механическая же гипотеза, развиваемая Ломоносовым и другими учеными, носила скорее качественный характер и не могла на том уровне предложить количественный метод описания наблюдаемых тепловых явлений. Идеям Ломоносова не хватало математического языка, чтобы переубедить сторонников гипотезы теплорода. Но по крайней мере ученый сумел заронить сомнения, что в конце концов ускорило расцвет кинетической теории теплоты, которая была

окончательно сформулирована в середине XIX в. в работах известного ученого Р. Клаузиуса.

Сокрушительным ударом по гипотезе теплорода были опыты, проведенные в 1798 - 1799 гг. *Б. Румфордом* (1753 - 1814) и *Г. Дэви* (1778 - 1829). Руководя работами по изготовлению пушек, Румфорд заметил, что при сверлении канала в пушечном стволе выделяется большое количество теплоты. Осуществляя этот процесс в воде, он доказал несостоятельность гипотезы теплорода. "Обсуждая этот предмет, - сообщал в своих опытах Румфорд, - мы не должны забывать учета того самого замечательного обстоятельства, что источник теплоты, порожденный трением, оказался в этих экспериментах явно неисчерпаем. Совершенно необходимо добавить, что это нечто, которое любое изолированное тело или система тел может непрерывно поставлять без ограничения, не может быть материальной субстанцией; и мне кажется чрезвычайно трудным, если не совершенно невозможным, создать какую-либо точную идею о чем-то, что в состоянии возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждается и передается в этих экспериментах теплота, если только не допустить, что это "что-то" есть движение".

Не менее эффектны были и опыты Дэви. Он показал, что при трении двух кусков льда под колоколом воздушного насоса выделяется значительное количество теплоты, достаточное для их плавления. Опыты Дэви не оставляли никакой надежды сторонникам теплорода. Невозможность проникновения теплорода к трущимся кускам льда была более чем убедительна. Однако и эти, казалось бы, сокрушительные удары не были смертельными для гипотезы теплорода.



Г. Дэрви

Несмотря на аргументированные и убедительные факты, механическая гипотеза теплоты продолжала оставаться в "золушках". Большая часть ученых не приняла ее по причинам, указанным выше; было мало логических утверждений и экспериментальных обоснований. Необходим был математический аппарат, пользуясь которым можно было бы рассчитать все известные тепловые явления и процессы. Этим и объясняется то, что всю первую половину XIX в. ученые в своих теоретических исследованиях использовали гипотетический теплород, хотя многие из них и чувствовали уязвимость подобной концепции. Гипотеза теплорода держалась в науке до тех пор, пока вопрос о превращении теплоты в работу не был поставлен на повестку дня. Эта гипотеза только тормозила дальнейшее развитие физики. Утверждение в науке механической теории теплоты почти не вызвало удивления в среде физиков: внутренне все они были готовы к этому. Не хватало только "песчинки", которая бы вызвала к жизни лавину исследований в области теплоты. Этой "песчинкой" оказалась работа Клаузиуса "О движущей силе тепла и о законах, которые могут быть получены из учения о теплоте", опубликованная в 1850 г.

Термометрия

Переход от ремесленного производства к мануфактурам был вызван потребностями общества. Кустари-ремесленники не могли обеспечить массовый спрос на некоторые виды товаров.

Только с появлением мануфактур появилась возможность снабдить рынок всем необходимым. Однако рынок диктовал свои условия: рост производительности труда не должен отрицательно сказываться на качестве выпускаемой продукции. Чтобы изменение количества не привело к снижению качества необходим был жесткий контроль за всеми технологическими операциями. Так как большинство технологических операций осуществляется в определенном тепловом режиме, возникла необходимость измерять и поддерживать эти условия. Особо остро этот вопрос стоял в металлургии и химической промышленности. Для соблюдения оптимальных тепловых условий необходим был прибор, регистрирующий какую-либо тепловую характеристику.

Изобретение первого прибора, измеряющего "градус теплоты", обычно связывают с именем Галилея. В 1597 г. Галилей изобрел устройство, которое по современным представлениям может быть названо термоскопом. Оно представляло собой шар, полость которого посредством тонкой трубки сообщалась с атмосферой. Конец трубки опускался в жидкость, и в зависимости от температуры воздуха в шаре он, расширяясь или сжимаясь, втягивал или вытеснял столбик жидкости. При этом высота столбика жидкости в трубке была пропорциональна температуре той среды, в которой находился шар.

Изобретение Галилея явилось первым шагом в становлении термометрии. Дело в том, что термоскоп конструкции Галилея не имел шкалы и только качественно характеризовал температуру той среды, с которой соприкасался. Далее, показания термоскопа существенно зависели от давления атмосферного воздуха и не могли служить однозначной характеристикой теплового фактора. Прибор, подобный термоскопу Галилея, был позже изобретен О. Герике, который знал о влиянии атмосферного давления на показания прибора, однако никаких мер по его устранению не предпринял.

Следующим шагом на пути создания термометра было изготовление термоскопа, в котором в качестве термометрического тела использовалась жидкость (рис. 2). Кто здесь был первым, трудно сказать. Некоторые историки науки предпочитают другим голландского естествоиспытателя Яна Баптиста ван Гельмонта (1579 - 1644). Есть также достоверные сведения, что уже в 1641 г. в Италии члены

академии пользовались приборами, в которых термометрическим телом был спирт. Более того, в приборах итальянских академиков резервуар и трубка, содержащие спирт, были запаяны, что совершенно исключало влияние атмосферного давления на показания приборов. Роль шкалы в них выполнял ряд бусинок, припаянных вдоль трубки. Однако и этот прибор еще нельзя назвать термометром, так как его шкала была произвольной: постоянными точками служили наибольший зимний холод и наибольшая летняя жара во Флоренции, где располагалась Итальянская Академия.

В 1693 г. английский ученый Э. Галлей (1656 - 1742) указал на постоянство точки кипения воды. Еще раньше члены Итальянской Академии установили постоянство точки ее замерзания. Но использовать в качестве отсчетных точек температуру замерзания и кипения воды, стабильные и легко воспроизводимые точки, первым в 1693 г. догадался итальянский ученый К. Ренальдини. Прибор Ренальдини можно считать первой действующей моделью современного термометра.

В 1701 г. И. Ньютон опубликовал описание изготовленного им термометра с льняным маслом в качестве термометрического тела. Для градуировки шкалы Ньютон использовал постоянные точки, соответствующие температурам кипения и замерзания воды. Далее в научных журналах все чаще и чаще появляются работы, посвященные усовершенствованию и разработке новых конструкций термометров.

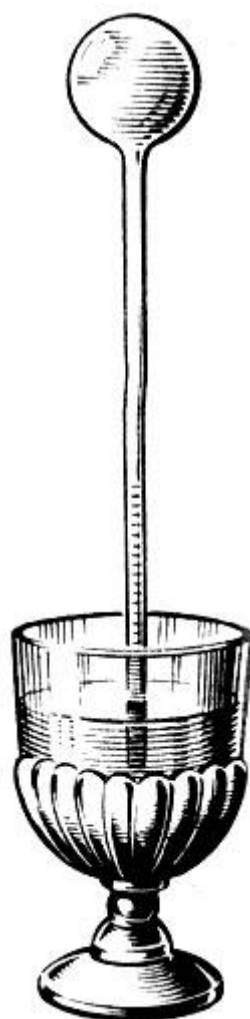


Рис. 2. Термоскоп, в котором в качестве термометрического тела использовалась жидкость

Однако, несмотря на некоторый прогресс в термометрии, ученые не были удовлетворены существующим положением дел. Их неудовлетворенность можно понять: термометры различных конструкций с разными термометрическими телами, помещенные, к примеру, в теплую воду, давали различные показания. Так что необходимо было продолжать научные поиски в этом направлении. Окончательное построение термометрии связано в основном с именами Фаренгейта, Реомюра и Цельсия.

Данцигский (Гданьский) стеклодув и изобретатель Д. Фаренгейт (1686 - 1736) в работе, опубликованной в 1724 г., описал изготовленный им термометр и способ его градуировки. За постоянные точки Фаренгейт принял температуру смеси воды и льда с нашатырем (32°) и температуру человеческого тела (92°). Позже им была

установлена и третья реперная точка - температура кипения воды, соответствующая 212° по его шкале.

В 1730 г. французский естествоиспытатель Р. Реомюр (1683 - 1757), занимаясь вопросами конструирования инкубаторов, предложил термометр с постоянной нулевой точкой, соответствующей температуре таяния льда. Один градус его шкалы соответствовал увеличению объема спирта, взятого им в качестве термометрического тела, на 0,001 первоначального объема. Температура кипения воды по его шкале соответствовала 80°.

В 1742 г. в печати появилась работа шведского астронома и физика А. Цельсия (1701 - 1744), в которой был описан ртутный термометр. В этой статье под названием "Наблюдения над двумя постоянными точками термометра" Цельсий приводит способ градуировки, которым он пользовался. "1. Шарик термометра вставляют в тающий снег и точно отмечают точку замерзания воды. 2. Затем отмечается точка кипения воды при высоте барометра в 25 дюймов¹ (нормальное давление. - В. К.). 3. Пространство между этими двумя точками делится на 100 равных частей, или градусов. Если эти деления продолжать еще ниже точки замерзания воды, то термометр готов". Через восемь лет астроном М. Штермер "перевернул" шкалу Цельсия, так как у изобретателя точка кипения воды соответствовала температуре 0°, а точка замерзания - 100°. В таком перевернутом виде термометры со шкалой Цельсия дошли и до наших дней.

¹ (Дюйм \approx 25,4 мм)

После основополагающих работ Фаренгейта, Реомюра и Цельсия в области термометрии конструкции термометров этих авторов постепенно вытеснили все существующие до них. С изобретением термометра качественные исследования тепловых процессов уступили место количественным. Значение термометра трудно переоценить. Хотя термометрия еще делала только первые шаги, ученые понимали важность этого открытия. Именно создание термометрии наконец-то столкнуло с "мертвой точки" учение о теплоте и способствовало интенсивному изучению тепловых процессов. Развитие термометрии вновь вызвало к жизни вопрос о природе теплоты, вопрос, поставленный еще Платоном и безуспешно развиваемый в течение многих столетий.

Шотландский химик и физик Д. Блэк (1728 - 1799), заинтересовавшийся термометрией, посвятил этой проблеме ряд своих исследований. Он первым ввел понятие удельной теплоемкости, установил существование удельной теплоты плавления и парообразования. Работы Блэка в свою очередь позволили Дж. Уатту внести усовершенствования в паровую машину. Именно с использованием термометра удалось окончательно решить вопрос о природе теплоты. Этот прибор способствовал созданию и становлению паровых машин, знаменующих собой огромный шаг на пути технического прогресса.

Создание первых тепловых двигателей

Силовые установки, использующие силу воды и ветра, с развитием машинного производства перестали удовлетворять зарождающуюся промышленность. Развитие торговли, транспорта, военной промышленности требовало новых источников энергии. Поиск принципиально нового типа двигателя стал "проблемой номер один". Среди пытливых исследователей природы были и те, кто смутно предчувствовал возможности использования энергии пара, но серьезных попыток в этом направлении до середины XVI в. не предпринималось. Главным препятствием на этом пути было то, что природа пара и его свойства были почти неизвестны. Однако уже во второй половине XVI в. исследователи начали интересоваться свойствами пара в надежде научиться использовать скрытую в нем энергию. В 1606 г. итальянский естествоиспытатель Д. Порта изобрел устройство, способное за счет расширения нагреваемого пара поднимать на некоторую высоту воду. В книге, вышедшей в 1615 г. во Франкфурте, Соломон де Ко описал устройство, способное под действием пара выталкивать воду в фонтанах. Были и другие, менее удачные попытки использования энергии пара.

Основной толчок развитию исследований по использованию энергии пара был дан набирающей силы капиталистической системой производства. Без мощных машин не могла обойтись ни горнорудная промышленность, ни металлургическая. Владельцы предприятий имели средства для поисковых работ и могли оплатить свой заказ науке. Ученые, во многих случаях зависящие от покровителей, вынуждены были заниматься исследованиями, имеющими чисто прикладное значение, т. е. именно тем, что интересовало заказчиков. Для серьезных

исследований требовались оборудование, лаборатории, приборы. Все это мог оплатить заказчик. Именно на этом этапе развития общества и произошло заметное сближение теории и практики, плодотворное для научного прогресса.

Первая задача, которую должны были решить исследователи, - найти способ откачивания воды из рудников. Изобретателями было предложено немало устройств, предназначенных для этого, но ни одно из них не удовлетворяло предъявляемым требованиям: экономичность, высокая производительность, простота в изготовлении и эксплуатации. Однако новый путь отыскать все-таки удалось.

В конце XVII в. разработкой этой актуальной задачи занялся французский изобретатель и физик Д. Папен (1647 - 1712), который построил пригодный для эксплуатации двигатель. К этому времени Папен уже получил известность в науке своими изобретениями. В Париже под руководством Гюйгенса он принимал участие в опытах с воздушным насосом; исследовал зависимость температуры кипения от давления. В 1680 г. Папен сообщил об изобретении им парового котла с предохранительным клапаном, предложил конструкцию центробежного насоса. В 1690 г. Папен издал книгу, в которой описал результаты своих экспериментов по исследованию свойств пара. Именно в ней было приведено описание первой паровой машины, сконструированной автором.

К идее создания паровой машины Папен пришел, размышляя над свойствами водяного пара. Так как вода способна испаряться под действием притока теплоты, рассуждает Папен, и при этом возникает упругая сила, как и у воздуха, а при охлаждении пар вновь превращается в воду и при этом упругая сила совершенно исчезает, то, по его мнению, легко построить машину, в которой с помощью воды можно получать полный вакуум. Создание и использование этого вакуума и было положено в основу паровой машины, сконструированной Папеном.

Основные части машины (цилиндр и поршень) были заимствованы у Гюйгенса, который пытался заставить работать подобное устройство с использованием пороха. Папен ассистировал Гюйгенсу во время этих экспериментов, которые закончились неудачно. Устройство Папена представляло собой цилиндр, в который наливалась вода.

Впрочем, послушаем лучше самого изобретателя: "Наливаю в цилиндр немного воды, опускаю в него поршень до самой поверхности оной, а воздух, заключенный под поршнем, выпускаю через отверстие особого крана, тогда действием огня, разведенного под цилиндром, вода в нем начинает кипеть и превращаться в пар, который производит сильное давление на поршень и поднимает его, преодолевая давление атмосферы, в это мгновение упорка, входящая в выемку, сделанную на стержне, задерживает поршень вверху, после чего убирается огонь и пар, сгустившись через охлаждение, производит в цилиндре пустоту. Теперь машина в состоянии произвести механическое действие, ибо по отнятии упорки поршень опустится с силой, равной давлению атмосферы, и может поднимать данное сопротивление с помощью веревки и блоков".

Однако действительность оказалась более суровой, чем того ожидал изобретатель. Попеременное нагревание и охлаждение цилиндра было энергоемким и поглощало очень много топлива. Но не это было главным. Основным недостатком была медлительность действия, что исключало возможность применения ее для откачки воды. Каждое поднятие и опускание поршня длилось около минуты. Но все-таки основная мысль Папена была верной.

Вскоре после выхода книги из печати Папен сообщил о своем изобретении на заседании Лондонского Королевского общества, членом которого он состоял с 1680 г. Ученые выслушали текст сообщения, одобрили саму идею, но особого восторга по поводу его несовершенной конструкции не высказали. Наиболее активным оппонентом Папена, выражающим мнение общества, был известный английский ученый Р. Гук. Папен был обескуражен критикой коллег, чувствовал глубину их аргументов.

В 1698 г. английский механик Т. Севери получил патент на паровой нагнетательный насос. Хотя его устройство было и действующим, но производительность была крайне низка: поднять воду на значительную высоту насос Севери не мог.

Заинтересовавшись первыми успехами своего соотечественника в области использования энергии пара, Королевское общество поручило заняться исследованием этого вопроса Т. Ньюкомену (1663 - 1729). В 1705 г. Ньюкомен

сконструировал вполне пригодный для работы насос, а в 1712 г. он в сотрудничестве с Севери построил паровую машину, которая приводила в действие водоотливные насосы. Удача пришла к нему после того, как он рабочий цилиндр отделил от котла. Пар, полученный в котле, по трубам подводился в цилиндр. Это усовершенствование значительно снижало расход топлива и позволило увеличить скорость перемещения поршня в десять раз. Действие машины было вполне удовлетворительным, о чем говорит тот факт, что в течение пятидесяти лет после изобретения машина Ньюкомена не претерпела существенных изменений. Изготавливаемые в эти годы машины копировали одна другую, отличаясь в лучшем случае лишь размерами и отделкой.

В России первая паровая машина была построена в 1765 г. И. И. Ползуновым (1728-1776). Специальное образование Ползунов получил в горнозаводской школе г. Екатеринбурга (ныне Свердловск), после окончания которой (1742) работал под началом главного механика уральских заводов. В 1748 г. он переехал в Барнаул и поступил работать на металлургическое предприятие техником по учету выплавляемого металла. Через два года молодой специалист был переведен в должность унтершихтмейстера. Именно в эти годы Ползунов начал интересоваться состоянием дел в горнообогатительной промышленности, регулярно посещал библиотеку завода. Познакомившись с работами М. В. Ломоносова по вопросам теплоты, он самостоятельно осуществил ряд экспериментальных исследований. Им были проведены опыты по определению плотности воды и воздуха, по исследованию механизма парообразования.

Детальное знакомство с описанием существующих паровых машин способствовало тому, что в 1765 г. Ползунов разработал проект первого в мире парового двухцилиндрового двигателя, в котором цилиндры "работали" на один общий вал. Таким образом, конструкция Ползунова была конструкцией универсального двигателя, в котором работа одного цилиндра использовалась для подъема воды: падение воды на колесо рождало движение, передаваемое необходимым устройствам.

Проект машины был послан на рецензию президенту Берг-коллегии И. А. Шлаттеру. Но Шлаттер "не заметил" новизны проекта: он предлагал конструктору включить в общую схему и водяное колесо "по образцу европейских". Однако

конструктор понимал, что включение дополнительного звена привело бы к падению мощности и, кроме того, означало бы топтание на месте, если не шаг назад. Но конструктор оказался более настойчивым и через некоторое время спроектировал новую машину мощностью 32 л. с.¹, рекордную для того времени, все-таки отказавшись от водяных колес, вопреки пожеланиям Шлаттера. Двухцилиндровая паровая машина (рис. 3) приводила в движение воздушные меха и работала непрерывно, что было большим преимуществом в отличие от устройства Ньюкомена.

¹ (Внесистемная единица мощности. 1 л. с. = 736 Вт)

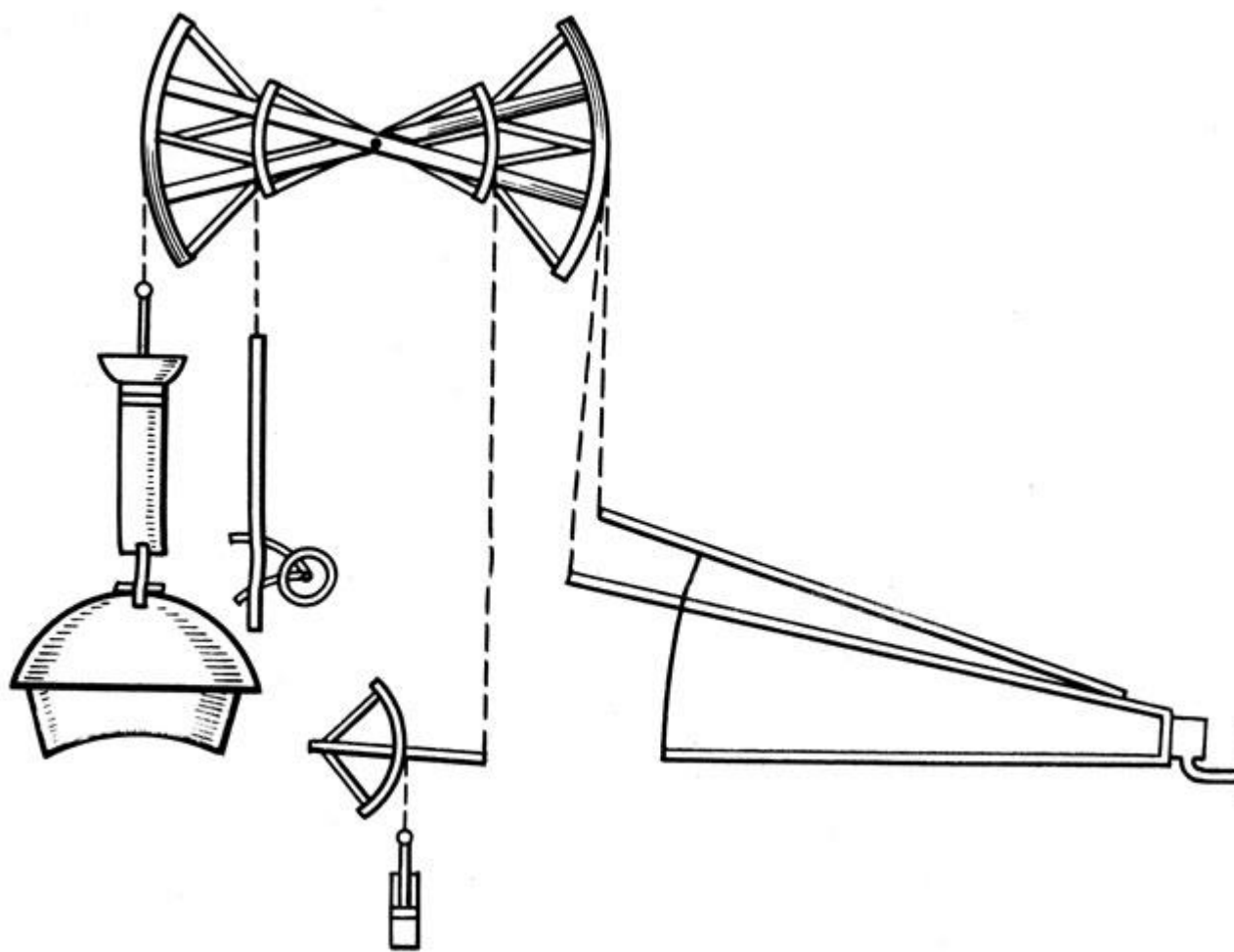


Рис. 3. Двухцилиндровая паровая машина

Нельзя не отметить и тот факт, что в процессе работы над паровой машиной Ползунов изобрел прибор для автоматического питания парового котла, крановое водо- и парораспределение, балансирный передаточный механизм от

цилиндров к потребителю, аккумулятор дутья ("воздушный ларь") и др.

За неделю до пуска машины Ползунов скончался от чахотки. 16 мая 1766 г. машина была запущена. Руководил запуском машины алтайский гидротехник и механик К. Д. Фролов. Эффективность работы паровой машины Ползунова была настолько высокой, что прибыль, полученная за 43 дня работы, вдвое превысила стоимость ее сооружения. Дальнейшая работа машины была прекращена вследствие неполадок в котле. И вместо того чтобы сменить котел, администрация завода навсегда остановила детище русского механика-изобретателя. Трудности, которые стояли на пути Ползунова, вполне объяснимы. Дешевый труд крепостных не вызывал нужды в подобных двигателях. Изобретения Ползунова были надолго забыты. Только через 30 лет после работ Ползунова в России началось производство паровых машин. Сегодня по принципу, созданному Ползуновым, работает свыше 100 млн. тепловых двигателей.

Наиболее значительные улучшения в конструкции паровой машины связаны с именем английского изобретателя Дж. Уатта (1736 - 1819). Занимая должность механика физического кабинета при Глазговском университете, Уатт получил задание починить машину конструкции Ньюкомена. Тщательно изучив эту машину, он придумал очень простое и принципиально важное усовершенствование. Вместо того чтобы осуществлять конденсацию пара в цилиндре, Уатт предложил выбрасывать его в атмосферу. Это существенно увеличило быстроходность машины и ее экономичность. Иными словами, он первым из конструкторов понял необходимость резервуара с более низкой температурой - холодильника. Уатт внес много усовершенствований в двигатель. Он предложил устройство, позволяющее преобразовать поступательное движение во вращательное, изобрел регулятор оборотов, парораспределитель, сконструировал и изготовил пружинный индикатор для исследования процессов, протекающих в цилиндре (метод индикаторных диаграмм), и много других усовершенствований.

Уатт дал паровой машине больше, чем все изобретатели, вместе взятые, работавшие до него в этой области. Благодаря его трудам появилась возможность использовать паровую машину на транспорте - для пароходов и паровозов. Развитию

паровых машин способствовала сравнительная простота их изготовления и удобство в обслуживании, а низкий коэффициент полезного действия пока не волновал их владельцев.

Таким образом, почти столетие понадобилось ученым различных стран, чтобы воплотить идею использования энергии пара в металл, приспособить пар для нужд зарождающейся промышленности. Процесс превращения теплоты в работу был, наконец, успешно завершен. "Паровая машина, - писал Ф. Энгельс в "Диалектике природы", - была первым, действительно интернациональным изобретением, и этот факт в свою очередь свидетельствует об огромном историческом прогрессе. Паровую машину изобрел француз Папен... Лейбниц... подсказал ему при этом основную идею: применение цилиндра и поршня. Вскоре после этого англичане Севери и Ньюкомен изобрели подобные же машины; наконец, их земляк Уатт, введя отдельный конденсатор, придал паровой машине в принципе ее современный вид. Круговорот изобретений в этой области был завершен: было осуществлено превращение теплоты в механическое движение. Все дальнейшее было только усовершенствованием деталей"¹.

¹ (Маркс К., Энгельс Ф. Собр. соч., т. 20, с. 431)

Паровая машина явилась первым представителем класса тепловых машин, роль которых даже спустя три столетия со времени изобретения, все еще остается значительной в современном машинном производстве.

Паровая машина победно шествовала по материкам и странам, постепенно приобретая все новые и новые профессии. Но также постепенно сказывались и недостатки ее конструкции. Для непрерывной работы тепловой машины необходимо много воды и топлива. Паровые машины буквально "пожирали" уголь, и широкое использование их имело смысл только там, где залежи топлива находились недалеко от производства. Однако они требовались и там, где не было запасов топлива, но зато имелось сырье для промышленного производства той или иной продукции. Неизвестно было, какой вариант дешевле: возить уголь туда, где располагали сырьем, или везти сырье в места, богатые запасами угля. Коэффициент полезного действия (КПД)

паровых машин, несмотря на все усовершенствования, был все еще низок. Потери теплоты были велики. Часть ее выбрасывалась в атмосферу, часть излучалась нагретыми деталями машины, часть уносилась вместе с дымом. Требовалась энергия и на преодоление трения в подвижных деталях машины.

Совершенно неизвестно было, как подступиться к расчетам паровых машин, какое вещество лучше использовать в качестве рабочего тела, какую температуру должен иметь пар. Неизвестно было и то, какие процессы протекают в цилиндрах паровых машин и какие должны осуществляться для того, чтобы получать большие значения КПД. Существующие в то время расчеты мощности были, скорее, интуитивными, чем научно обоснованными.

Следует отметить, что наряду с усовершенствованием паровой машины в начале XIX в. получает развитие идея двигателя внутреннего сгорания, представляющего собой новый тип теплового двигателя, несколько отличный по конструкции от паровой машины. Если не учитывать первые неудачные попытки Гюйгенса, то первыми на пути создания нового типа теплового двигателя были французские изобретатели братья Ньепсы. В 1794 г. в окрестностях Ниццы, в маленькой деревушке, Ньепсы приступили к конструированию нового типа двигателя - пирэолофора, как его называли изобретатели. Цель у них была та же, что и у конструкторов паровой машины, - превращение внутренней энергии в механическую. Они предполагали, что их способ будет более дешевым.

Ньепсам удалось воплотить свой проект в металл. Первый двигатель их конструкции работал, используя в качестве горючего ликоподий - семена спорового растения. Несколько позже - на порошкообразной смеси каменного угля и смолы. В конце 1816 г. опытный образец пирэолофора приводил в действие судно, бороздившее воды Сены.

Несмотря на то что Ньепсам удалось получить на свой двигатель патент Французской Академии наук и построить работающий по четырехтактному циклу двигатель, работа в этом направлении закончилась неудачей. Первые образцы двигателей Ньепсов были несовершенны. Требовалась дальнейшая работа по улучшению их конструкции, а для этого

нужны были время и деньги. Постройка опытных судов, содержание мастерской, консультации со специалистами привели их к полному разорению. Следует добавить, что у изобретателей были не только сочувствующие, но и те, кто противостоял их идее. Новый двигатель подрывал позиции банкиров, предпринимателей и специалистов, связанных с изготовлением и применением паровых машин в промышленности и на транспорте. Это сопротивление сломало волю братьев. Они не получили признания не только у современников, но и у потомков. Вся беда изобретателей состояла в том, что они приступили к созданию нового типа двигателя в то время, когда еще не существовало теории тепловых двигателей. Все делалось чисто интуитивно. Только через полвека, в 1860 г., после того как была создана теоретическая база, соотечественнику Ньюпсов - Э. Ленуару (1822 - 1900) удалось изготовить первый двигатель внутреннего сгорания, пригодный для эксплуатации.

Теоретически проблему экономичности удалось решить молодому инженеру французских войск Сади Карно. "У Сади Карно, - пишет А. Пуанкаре, - не было, собственно говоря, предшественников; в его время термические машины были еще мало известны, никто еще не задумывался над их теорией и он, несомненно, первый поставил известные вопросы и первый разрешил их". .

Теоретические исследования Карно в области тепловых машин были продолжены его соотечественником Б. Клапейроном, который далее развил идеи Карно, придав им математическую форму и графически интерпретировав их.

Завершил труд французских коллег немецкий физик Р. Клаузиус, который, используя все самое важное в работе предшественников построил механическую теорию теплоты и тем самым разрешил многовековой спор ученых в пользу механической теории. Он по-иному взглянул на идеи Карно и, выбросив из них теплород, оставил все самое ценное и необходимое для дальнейшего развития этой отрасли знания.

Так закончился этот путь, растянувшийся на тысячелетия. В конце концов человечество сумело не только осуществить процесс превращения теплоты в работу, но и понять физическую сущность процессов, сопровождающих это превращение.

Глава II. Сади Карно - создатель термодинамики

Биографические сведения

Сади Никола Леонард Карно родился 1 июня 1796 г. в Париже. Годы детства и юности Сади совпали с бурным революционным периодом Франции. Отец будущего ученого Лазар Карно находился в самом центре политических событий страны того времени. Крупный ученый, выдающийся политический деятель, талантливый военачальник. Влияние отца на сыновей Сади и Ипполита было огромным. В самые трудные для республики дни Лазар находил время заниматься с ними фехтованием и плаванием, математикой и философией. Сади глубоко чтит своего отца и был всю жизнь благодарен ему за те знания и умения, которые тот сумел передать детям. Изучать жизнь и научную деятельность Сади Карно невозможно в отрыве от событий того времени, от того, чем жил его отец.

Лазар Карно родился в г. Ноле в семье адвоката 13 мая 1753 г. Начальное образование получил в колледже г. Атунь. Для продолжения образования отец записал его в одно из учебных заведений Парижа, где юношей готовили для поступления в высшие военные школы. Способности Лазара к математике уже в ранние годы были отмечены преподавателями. Однажды школу с инспекторской проверкой посетил Далам-бер. Успехи юноши не оставили его равнодушным: он горячо хвалил Лазара Карно и предсказывал ему блестящее будущее.

Успешно окончив в 1771 г. подготовительный класс, Лазар в звании подпоручика поступает в Мезьерскую школу военных инженеров, где ему предстояло пробыть два года. Самой заметной фигурой среди преподавателей в те годы был Г. Монж, создатель начертательной геометрии. Лекции этого ученого и педагога оказали влияние на формирование Л. Карно как ученого. Об успехах подпоручика этих лет судить трудно, так как все документы, отчеты и оригинальные работы по укреплению и строительству крепостей представляли собой военную тайну и не предавались гласности. Но, как показала его последующая деятельность, вряд ли их можно считать незначительными.

В 1773 г., завершив образование, Л. Карно в чине поручика был отправлен в Кале для продолжения службы. Через

некоторое время Л. Карно направляется командующим гарнизоном в Аррас, где знакомится с М. Робеспьером, несомненно оказавшим влияние на его политические взгляды, и с аббатом Фуше, который в свободное время занимался физикой и астрономией. В 1783 г. Л. Карно был произведен в капитаны, и в этом же году он выступил в печати с первой научной статьей, о которой впоследствии очень похвально отзывался Д. Араго. В январе 1784 г. Л. Карно представил Академии наук свой ме-муар об управляемых аэростатах и их применении в военном деле.



Л. Карно



С. Карно

Следует отметить, что Л. Карно очень много занимался научными исследованиями. В 1784 г. (без указания имени автора) вышла его работа "Опыт о машинах вообще", которая была хорошо принята в ученом мире. В этой работе он сформулировал и доказал теорему о "живой силе"¹, исследовал вопрос о коэффициенте полезного действия машин. В этой же работе несколько страниц Л. Карно посвятил вопросу о вечном двигателе. Он утверждал, что всякая машина, запущенная однажды, непременно остановится. Все доказательства, проведенные автором в этой работе, "превосходны", по оценке Араго. "Выдумщики вечных двигателей, - писал его биограф, - не поймут доказательств Л. Карно, так же как и изобретатели квадратуры круга не понимают геометрии Эвклида". Эта статья была впоследствии переработана и издана вторично (1796) уже с указанием имени автора.

¹(Термин "живая сила" в то время означал кинетическую энергию. Теорема Л. Карно - теорема о потере кинетической энергии при неупругом ударе. (См.: БСЭ. 3-е изд., т. 11, с. 447.))

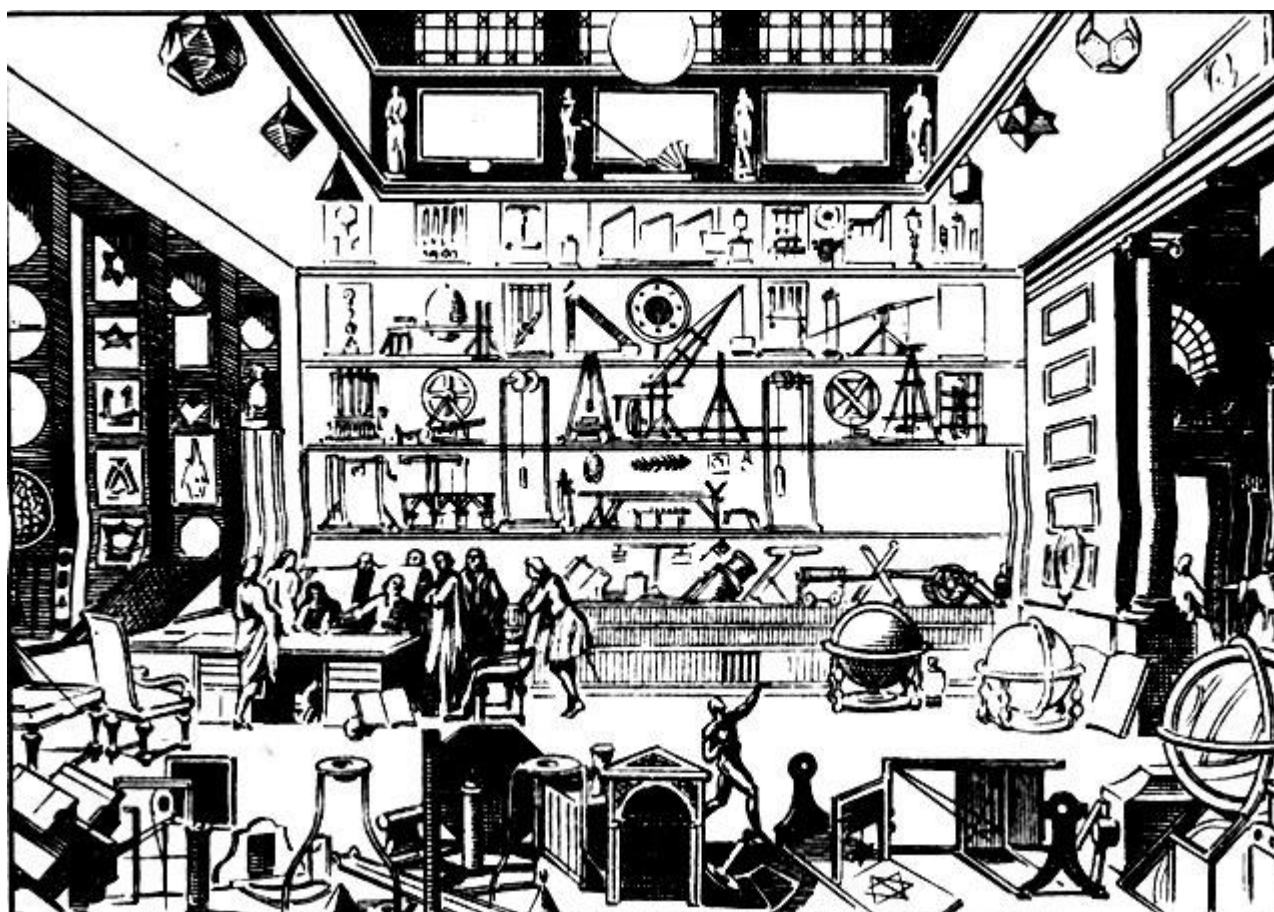


Рис. 4. 1796 г. для Лазара Карно был особенным. В этом году он был избран членом Французской Академии наук

С началом революционных событий во Франции Л. Карно активно включается в общественное движение. Его активные выступления, революционные по своему духу, способствуют его избранию членом полкового комитета, президентом Аррасского общества друзей конституции, которое выступало за установление во Франции республики. Вскоре его избирают депутатом Законодательного собрания.

Переезд в Париж способствовал становлению Л. Карно как общественного и политического деятеля. Его выступления в Законодательном собрании были категоричны, резки, совершенно лишены дипломатичности и не всегда получали поддержку среди членов собрания.

1796 г. для Лазара Карно был особенным. В этом году он был избран членом Французской Академии наук (рис. 4). В этом же году у него родился сын Сади. Л. Карно продолжает заниматься научными исследованиями, много времени уделяет воспитанию детей, развивая в них интерес к физическим, математическим и философским вопросам.

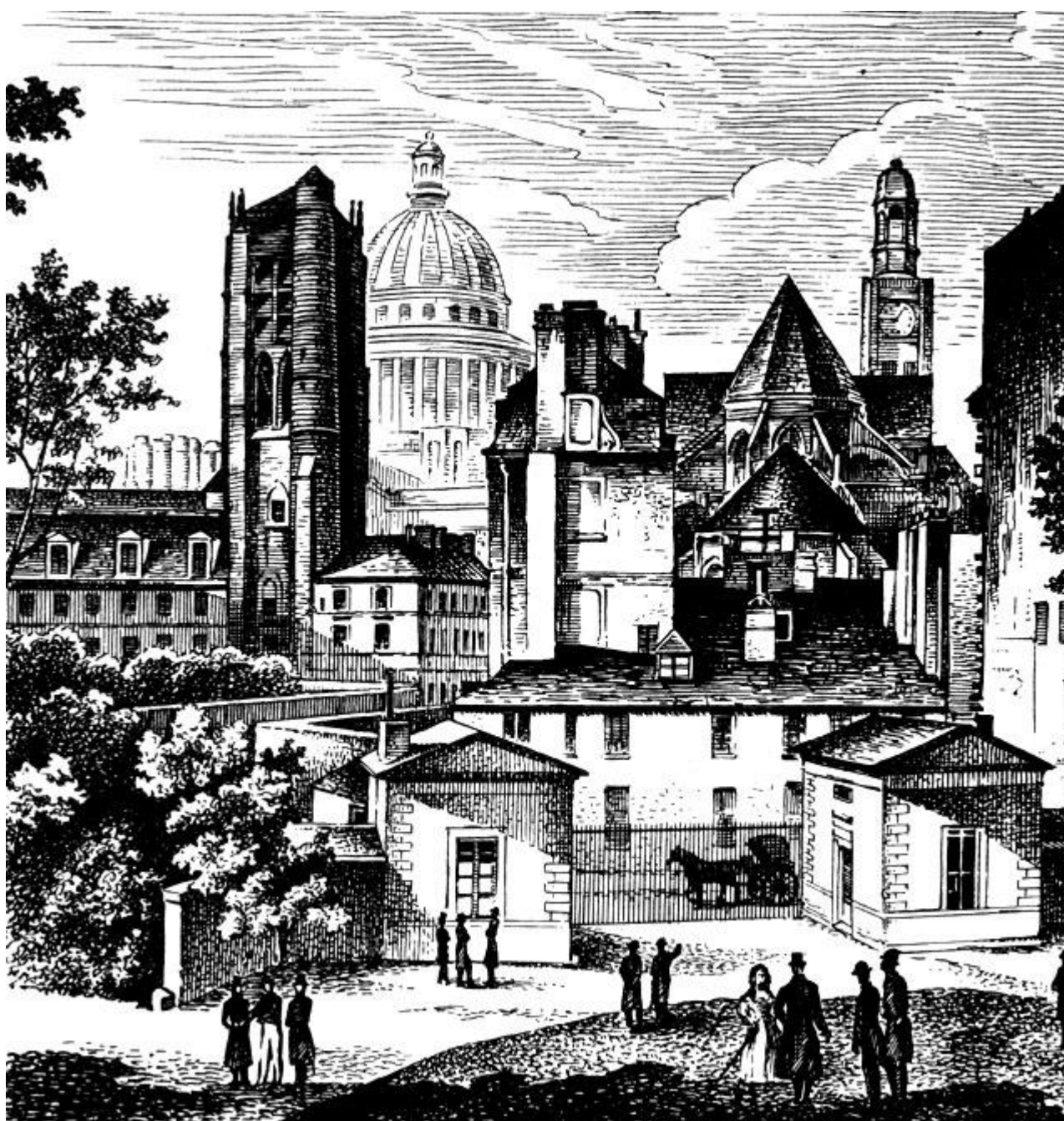


Рис. 5. Политехническая школа

Одновременно с домашней подготовкой под руководством отца Сади посещал лицей Карла Великого. Обучение шло легко: способности к математике и физике он унаследовал от отца; от него же перенял любовь к языкам и поэзии. Музыкальность досталась от матери. Лицей блестяще был окончен, и родители должны были решать вопрос о продолжении образования сына. При явной настойчивости отца Сади решено было определить в Политехническую школу, детище революции, лучшее учебное заведение Франции того времени. Политехническая школа (рис., 5) - это плод

революционных преобразований в системе просвещения республики. 28 сентября 1794 г. в Париже в соответствии с решением революционного правительства была открыта Центральная школа общественных работ, которая была создана для подготовки военных и гражданских инженеров. 1 сентября 1795 г. Центральная школа была преобразована в Политехническую. Произошли изменения и в уставе школы. Срок обучения был увеличен с двух лет до трех; учащиеся отбирались по конкурсу и обеспечивались стипендией. Преподавание было поручено крупным ученым. Политехническая школа готовила специалистов для инженерной работы. Наиболее способные выпускники могли заниматься теоретическими исследованиями в области точных наук. И правительство, и преподаватели, и учащиеся не жалели времени и сил, чтобы решить поставленную задачу. И не случайно именно выпускники Политехнической школы составили впоследствии научную славу Франции. В разные годы Политехническую школу окончили А. Ампер, Д. Араго, Ж. Био, Ж. Гей-Люссак, О. Кошй, Б. Клапейрон, П. Дюлонг, Ж. Фурье, А. Реньо, Г. Кориолис, С. Пуассон, О. Френель и много других, не менее известных деятелей науки.

И вот в это учебное заведение Л. Карно решил устроить своего шестнадцатилетнего сына. Экзамены были успешно сданы. Обучение в школе проходило легко: сказывалась предварительная подготовка.

В октябре 1814 г. Сади Карно окончил Политехническую школу шестым по успеваемости и сразу же был направлен в Метц для продолжения образования. Об этом периоде его жизни почти ничего неизвестно. Лишь в воспоминаниях его брата упоминается, что в эти годы Сади написал несколько статей, ныне утерянных, но получивших, по его словам, высокую оценку специалистов.

В 1816 г. Сади Карно закончил обучение в Метце и приступил к службе в инженерном полку в звании лейтенанта. В его обязанности входило обследование гарнизонов и укреплений, составление планов, смет и отчетов. Однако результаты его деятельности были заранее обречены на забвение из-за царившего в армии бюрократизма. Отсутствие условий для самообразования и возможностей для приложения своих знаний, застой и скука гарнизонной службы приводили его в отчаяние, и он мечтал о том дне, когда ему удастся

изменить свое положение. Дальнейшее продвижение по службе для него было практически невозможным в связи с репрессиями в отношении отца. Но выход был найден. В 1819 г. Сади, воспользовавшись первой возможностью оставить службу в гарнизоне и успешно выдержав конкурсные экзамены, был зачислен в Главный штаб корпуса, находящийся в Париже. Он немедленно переезжает в Париж и поселяется в доме отца.

С. Карно с первых же дней приступает к изучению научных публикаций, знакомится с наиболее важными работами в области физики. В свободные от службы часы он посещает лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, Консерватории искусств и ремесел. Много времени уделяет посещению библиотек и музеев. С большим интересом знакомится с промышленными предприятиями, вникает в сущность технологических процессов, принимается за теоретические исследования в области паровых машин. 12 июня 1824 г. выходит в свет первая и единственная работа двадцативосьмилетнего военного инженера. Работа называлась "Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу". Через два дня после выхода из печати работа молодого ученого была официально представлена Академии наук и получила благожелательную рецензию, в которой отмечалась возможность практического использования двигателей, теоретически рассмотренных автором. Несмотря на, казалось бы, благоприятное отношение коллег, важнейшие результаты работы Карно не были поняты. Это объясняется тем, что основные идеи, рассматриваемые в работе, были сформулированы в науке впервые. Необычность логических построений автора вызывала недоверие. Только спустя много лет работа С. Карно стала хрестоматийной.

В период революции 1830 г. Карно, как и вся прогрессивная интеллигенция, был захвачен общим подъемом и всячески стремился содействовать становлению республики. Он входил в Политехнический союз, объединявший выпускников Политехнической школы, целью которого было проведение совместных исследований для поддержания экономики молодой республики. Кроме того, С. Карно вступил в Политехническую ассоциацию, которая была создана с целью распространения научных знаний среди народных масс.

В эти годы Карно занимался исследованиями в области физики паров и газов, пытался найти вид уравнения, связывающего температуру и давление, занимался вопросами природы теплоты и уделял много внимания поиску соотношения между теплотой и работой. Эти исследования остались незавершенными. Часть заметок, которые дают возможность ознакомиться с воззрениями Карно в последние годы жизни, была опубликована спустя 54 года после смерти ученого. 24 августа 1832 г., в возрасте тридцати шести лет, он умер от эпидемии холеры, свирепствовавшей в то время в Париже. В соответствии с существовавшим положением все его личные вещи, включая и черновики, содержащие результаты его научных поисков последних лет, были уничтожены. Но имя его избежало забвения.

27 августа сообщение о его смерти появилось на первой странице официальной парижской газеты "Монитор". В этом же номере была дана краткая биографическая справка и помещена рецензия на его исследования, которые характеризовались как "замечательные".

Из научного наследия С. Карно сохранилось немного. Самая ранняя его работа - рукопись объемом в 21 страницу - была первым вариантом основной работы. В ней Карно предпринял первую попытку вычислить энергию, которой обладает пар массой 1 кг. Здесь же кратко проведено исследование всех видов процессов, выделены основные типы тепловых машин и показано деление их по присущим им свойствам. Полный цикл работы теплового двигателя был разделен на три этапа: первый этап, или такт, по современной терминологии, представлял собой изотермическое расширение, второй - адиабатное расширение и третий - изотермическое сжатие.

Хотя Карно и утверждал, что описываемый им в этой работе цикл полный, в действительности дело обстояло не так. Утверждения Карно относились не к рабочему телу, а к движущемуся поршню. Рабочее тело, которое использовалось при этом, не возвращалось к исходной температуре. Зная закон о насыщении паров и найденное Дальтоном приближенное значение давления пара, Карно получил зависимость между начальными и конечными температурами и давлением. Используя таблицу Дальтона, устанавливающую

связь давления и температуры, Карно вычислил энергию единицы массы пара как функцию только одной температуры.

Наибольшее значение имеет его опубликованная работа. Посмертно изданные заметки хотя и содержат ценную информацию, но какого-либо влияния на последующее развитие учения о теплоте не оказали. Однако и того, что содержится в "Размышлениях..." достаточно, чтобы имя Сади Карно поставить в ряду великих имен испытателей природы и считать его одним из основателей термодинамики.

"Размышления о движущей силе огня..."

В годы, предшествующие написанию работы Карно, экспериментально был установлен факт нагревания газов при сжатии и охлаждения их при расширении. Известно было также и то, что не только теплоту можно получить за счет произведенной работы, но и теплота способна производить "движущую силу" - работу. Взаимность этих превращений была несомненна. Естественно, что у ученых, изучающих эти процессы, должен был возникнуть вопрос: одинаковое или различное количество теплоты можно получить, производя определенную работу? И обратно: при сообщении системе определенного количества теплоты всегда ли произведенная работа должна быть одинакова? И далее: если не одинаковое количество теплоты, то при каких условиях процессы взаимопревращения теплоты и работы будут наиболее эффективными? Эти вопросы были важны не только для науки, но и для практики, для развивающегося машинного производства. Сади Карно был хорошо знаком с ситуацией, сложившейся в промышленности, и четко представлял ее нужды. Это можно понять, едва приступив к знакомству с его работой.

"Никто не сомневается, - пишет ученый, - что теплота может быть причиной движения, что она даже обладает большой двигательной силой: паровые машины, ныне столь распространенные, являются этому очевидным доказательством... Развивать эту силу и приспособлять ее для наших нужд - такова цель тепловых машин. Изучение этих машин чрезвычайно интересно, так как их значение весьма велико и их распространение растет с каждым днем". Далее Карно описывает ситуацию, сложившуюся к тому времени в теории этих двигателей: "Несмотря на работы всякого рода,

предпринятые относительно паровых машин, несмотря на удовлетворительное состояние, в которое они теперь приведены, их теория весьма мало подвинута и попытки их улучшить почти всегда руководствовались случаем".

Факт многократного обращения автора к подлинным словам Карно при обсуждении его работы вполне объясним. Язык работы Карно настолько точен и корректен, что трудно передавать содержание его идей и мыслей своими словами, не ухудшая впечатления от работы. Удивительная доступность, последовательность и ясность изложения покоряют читателя с первых же страниц. Чтение его работы доставляет поистине эстетическое наслаждение. И удивительным представляется тот факт, что этот шедевр научной литературы остался практически не понят и не принят современниками ученого. Поражает коллективная близорукость ученых и инженеров, работавших в области конструирования и создания паровых машин. Правда, спустя полтора столетия мы можем удивляться и осуждать современников ученого, но нужно представить то время, когда работа Карно вышла из печати, чтобы понять и хоть частично реабилитировать их.

Незаслуженное равнодушие ученых и практиков к работе Карно объясняется рядом причин. Одной из них является то, что в своих исследованиях Карно воспользовался вещественной теорией теплоты, т. е. в своих рассуждениях оперировал теплородом. Хотя вещественная теория теплоты имела еще много сторонников, но их ряды уже не были так сплочены, как в конце XVIII в. Число сомневавшихся в существовании теплорода значительно возросло особенно после того, как были опубликованы результаты опытов Румфорда и Дэви. Наиболее прогрессивные ученые не могли по своим убеждениям делать шаг назад, а остальные... Но это уже другая причина. Прохладный прием работы Карно обусловлен еще и тем, что разрабатываемая им область знания была совершенно новой и понять его рассуждения могли только незаурядные личности. Но естествоиспытатели такого высокого ранга были увлечены каждый своим делом, работали в своей области знания и обращать внимание на первую публикацию молодого военного инженера не сочли нужным. Но и это не все.

Не следует забывать также и то, что работа Карно вышла в годы разгула реакции, репрессий в отношении лиц,

выступавших в поддержку республики. Имя Лазара Карно было одним из первых в списках преследуемых, и даже после смерти с него не сняли обвинений в антироялистской деятельности. Сыну опального генерала трудно было надеяться на забывчивость тех, кто представлял в те годы власть Франции. Внимание к работе С. Карно со стороны ученых могло быть истолковано как сочувствие или поддержка республиканского режима, как противопоставление идей, за которые боролся его отец.

Карно не мог не знать об опытах Румфорда и Дэви и, надо полагать, глубоко чувствовал уязвимость концепции теплорода. Это можно подтвердить цитатами из работы, в которых высказываются сомнения относительно реальности теплорода, используемого им в рассуждениях. Так, он пишет: "Впрочем, заметим мимоходом, основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории". Далее он снова возвращается к этому: "Основной закон, который мы старались установить, требует, по нашему мнению, новых подтверждений, чтобы быть вне всякого сомнения; он опирается на признаваемую в настоящее время теорию тепла, которая, нужно сознаться, не представляется нам непоколебимой твердостью". Неудовлетворенность автора принятой им теорией теплоты высказывается им и в других местах работы. Но дальше этих сомнений Карно не пошел, и эта его раздвоенность также в некоторой степени объяснима.

Карно понимал новизну своих выводов, знал, что он первым вступил на неизведанный путь, чтобы более уверенно вести по нему читателей, возможно, сознательно отказался от полемики по поводу природы теплоты, чтобы не отвлекаться от того нового, что было разработано им. Позже, как мы покажем, он отказался от теории теплорода и самостоятельно пришел к пониманию теплоты как движения микрочастиц.

Комментируя результаты, достигнутые в области термодинамики, Ф. Энгельс отметил огромную заслугу Карно в ее становлении. "...В двадцатых годах Сади Карно, - пишет Энгельс, - занялся этим вопросом (получением работы за счет теплоты. - В. К.) и разработал его очень искусным образом, так что лучшие из его вычислений, которым Клапейрон позднее придал геометрическую форму, сохранили свое

значение и до нынешнего дня в работах Клаузиуса и Клерка Максвелла. Он добрался почти до сути дела; полностью разобраться в вопросе ему помешал не недостаток фактического материала, а исключительно только предвзятая ложная теория..."¹.

¹ (Маркс К., Энгельс Ф. Собр. соч., т. 20, с. 431)

Успешному решению задачи способствовала точная формулировка ее. В самом начале своего трактата Карно, не злоупотребляя терпением читателя, с присущим ему лаконизмом пишет: "Часто поднимали вопрос: ограничена или бесконечна движущая сила тепла, существует ли 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 преимуществ. Мы ставим себе задачу подвергнуть здесь эти вопросы внимательному рассмотрению".

Если рассуждения Карно перевести на современный язык, то высказанное им можно представить в виде трех вопросов: от чего зависит КПД теплового двигателя? Существует ли предел его повышения? Изменяется ли КПД в зависимости от природы рабочего тела?

В первом вопросе появляется термин "тепловой двигатель" вместо "паровой машины". Это не случайность. Удивительно именно то, что Карно берется решать сформулированные выше вопросы не для паровой машины в частности, а для теплового двигателя вообще. "Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, - вносит ясность Карно, - надо его изучить независимо от 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 не производили воздействие".

Удивляет смелость и уверенность автора в своих силах. В те годы не существовало других тепловых двигателей, кроме паровой машины. Двигатели внутреннего сгорания появились

почти спустя полвека после выхода из печати работы Карно, а турбины и реактивные двигатели еще и не всходили на горизонте инженерной мысли. Нужно было обладать огромной силой абстрактного мышления, чтобы проникнуть в самую суть проблемы, имея минимум информации. Ученый блестяще справился с этим. Отвлекаясь от частных особенностей машины, ее размеров, природы рабочего тела и др., Карно сумел найти путь, следуя которым можно добиться повышения эффективности работы тепловых машин.

Приступая к анализу работы тепловых машин, он был убежден, что тепловые машины нельзя свести к механическим, и совершенно четко различал механические машины, преобразующие движение в пределах одной формы, и тепловые машины. Иными словами, Карно представлял, что теория тепловых двигателей не может быть разработана с позиций теоретической механики.

Прежде чем строить теорию тепловых машин, преобразующих теплоту в работу, необходимо было выяснить, что же является причиной произведенной работы. В самом начале своих "Размышлений..." Карно высказывает мысль, что этой причиной является наличие разности температур. Существование разности температур двух тепловых резервуаров создает условие для перехода теплоты от тела с более высокой температурой (нагревателя, в последующем изложении) к телу, температура которого ниже (холодильнику). В первую очередь он формулирует Положение, которое в дальнейшем явит ся главным пунктом всех его рассуждений. Это положена".* известно в науке как принцип Карно. "Согласно этому принципу, - пишет ученый, - недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезной... Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы".

Следует отметить, что все последующие его рассуждения относятся не только к газам: любое тело, которое может изменять объем при нагревании, может быть использовано для получения движущей силы. Важно, подчеркивал Карно, чтобы теплота заставляла тела изменять объем или форму. Изменение объема или формы, продолжает свою мысль автор, возможно только при действии на тело "теплоты и холода".

Следовательно, разность температур или наличие двух тел с разными температурами - главное условие для получения работы за счет теплоты. Примечательно и то, что здесь же Карно предлагает и обратное: "Повсюду, где можно затратить эту силу (работу. - В. К.), возможно образовать разность температур, возможно нарушить равновесие теплорода". Следовательно, Карно был первым ученым, который разрабатывал теорию не только тепловых машин, но и холодильных.

Далее следует описание условий, при которых должна работать тепловая машина. Нагреватель и холодильник этой машины должны быть такими, чтобы, отдавая или принимая теплоту, они сохраняли постоянной свою температуру или обладали бы бесконечной теплоемкостью. Это условие предполагает сохранение постоянными уровней, между которыми

переходит теплород. Эти требования вытекали при проведении аналогии между тепловой машиной и водяной мельницей. Карно отмечает, что обе машины - и тепловая и машина, работающая за счет падающей воды, - производят работу, которая определяется разностью температур для тепловой машины и перепадом уровней воды для водяной мельницы. При падении воды движущая сила, по Карно, пропорциональна разности уровней в верхнем и нижнем резервуарах. Добиться увеличения движущей силы для тепловой машины можно, увеличивая температурный интервал между нагревателем и холодильником. Однако неизвестно было, существует ли и здесь пропорциональность.

Одним из важных достижений Карно, способствующих решению поставленного им вопроса, следует считать введение циклов - круговых замкнутых процессов. Он считал, что рабочее тело, находясь в определенном состоянии, при внешнем воздействии на него может изменить это состояние и, проходя через ряд промежуточных, возвратиться в состояние, в точности совпадающее с исходным. Затем все начинается сначала: рабочее тело проходит периодически через одни и те же состояния. Эта периодическая смена состояний рабочего тела - основа работы тепловой машины. Если допустить, что какой-то из параметров системы после завершения цикла будет отличаться от первоначального хотя бы на бесконечно малую величину, то после завершения достаточного

количества циклов в системе накопились бы настолько значительные отклонения, что работа тепловой машины стала бы невозможной.

Необходимо отметить, что в дальнейших рассуждениях Карно использует идеальную тепловую машину, созданную им, как отмечал Ф. Энгельс, силой абстрактного мышления. Он предположил, что трения в движущихся частях машины не существует, потери теплоты нагретыми частями машины сведены к минимуму, а точнее, отсутствуют. Главные требования, которые он предъявляет к своей машине и к режиму ее работы, - квазистатичность и обратимость. Квазистатичность означает, что изменения состояния газа в тепловой машине происходят столь медленно, что температура и давление, соответствующие этому изменению, успевают выравниваться во всех частях занимаемого газом объема. Иными словами, квазистатические процессы есть лучшее приближение к равновесным. Уравнение, описывающее состояние газа, применимо именно для равновесных и с большой точностью для квазистатических процессов. Квазистатичность процессов подразумевает и их обратимость: любой равновесный или достаточно близкий к нему процесс можно осуществить как в прямом, так и в обратном направлении. При этом обратный процесс проходит через те же состояния, что и прямой. Все эти условия - квазистатичность и обратимость - ввел в термодинамику Карно.

В последующих рассуждениях Карно доказывает теорему о независимости КПД тепловой машины от природы рабочего тела. Доказательство этой теоремы он проводит, исходя из невозможности осуществления вечного двигателя. Карно, как и ряд других ученых, интуитивно предвидел бесплодность попыток обеспечить вечное движение и без всяких колебаний положил этот факт в основу своих рассуждений. Исходя из невозможности осуществления вечного двигателя, он доказал, что эффективность работы тепловой машины не зависит от природы рабочего тела. Познакомимся вкратце с этим доказательством.

Пусть имеются две тепловые машины, одна из которых работает по прямому циклу, вторая - по обратному. Далее предположим, что обе машины имеют общий нагреватель и холодильник, т. е. работают в одинаковом температурном

интервале. Причем в качестве рабочего тела используются различные вещества. Пусть в прямом цикле некоторое количество теплоты переходит от нагревателя к холодильнику и при этом совершается определенная работа. В машине, работающей по обратному циклу с другим рабочим телом, за счет этой работы происходит перенос теплоты от холодильника к нагревателю, значение которой равно использованной в машине, работающей по прямому циклу. Если при каких-либо условиях удастся получить в прямом цикле больше работы, чем затрачивается в обратном, то по истечении нескольких циклов существующая разность может неограниченно возрасти. Это означало бы, что мы имеем вечный двигатель, невозможность создания которого была принята в самом начале рассуждений. Аналогично можно провести рассуждения и относительно машины, работающей по обратному циклу. Остается признать, что эффективность работы тепловой машины не зависит от природы рабочего тела и от условий превращения теплоты в работу, а полностью определяется разностью температур холодильника и нагревателя.

Далее Карно приступает к решению задачи о максимуме движущей силы, полученной за счет теплоты нагревателя. В первую очередь он отмечает, что для повышения эффективности процесса преобразования теплоты в работу необходимо, чтобы теплота, отнятая рабочим телом от нагревателя, расходовалась только на расширение пара или газа, а не на его нагревание. Именно при расширении рабочего тела поршень может совершать работу над внешними телами, а теплота, переданная пару, обесценивается и его внутренняя энергия вклада в работу не дает. Следовательно, чтобы осуществить переход теплоты в работу с большей эффективностью, необходимо использовать рабочее тело с температурой, равной температуре нагревателя.

Но известно, и Карно это знал, что при контакте двух тел с одинаковой температурой теплота не будет переходить от одного тела к другому. Чтобы обойти это препятствие, он допускает следующее: температура рабочего тела должна отличаться от температуры нагревателя на бесконечно малую величину. Это допущение не противоречит его предыдущим и последующим рассуждениям. Как только рабочее тело вступит в контакт с нагревателем, температура газа повысится на бесконечно малую величину и пар (или газ), расширяясь,

переместит поршень на бесконечно малое расстояние. При бесконечно малом расширении рабочего тела температура его понизится также на бесконечно малую величину и теплота вновь может переходить от нагревателя к рабочему телу. При этом в течение всего процесса расширения температура рабочего тела и температура нагревателя будут равны с точностью до бесконечно малой величины.

Описанный процесс можно осуществить, рассуждает далее Карно, если расширение производить очень медленно, так, чтобы температура газа в цилиндре и его давление успели выравниваться во всех точках предоставленного ему объема. Следовательно, осуществляя квазистатический процесс, рабочее тело, изотермически отбирая от нагревателя определенное количество теплоты, сможет произвести максимальную работу.

Для того чтобы повторить описанный выше процесс, необходимо вернуть поршень, а следовательно, и рабочее тело в исходное состояние, т. е. произвести изотермическое сжатие рабочего тела. Это в принципе осуществимо, но для того, чтобы провести этот процесс, необходимо совершить внешними силами в точности такую же работу над рабочим телом, как и совершаемую газом при его расширении, если при этом не учитывать работу сил трения. Следовательно, в идеальных условиях работа, произведенная рабочим телом за цикл, была бы равна нулю. Гораздо выгоднее, пишет Карно, сжимать газ при более низкой температуре: в этом случае потребуется совершить меньшую работу сжатия в сравнении с работой, произведенной рабочим телом при его расширении. Разность работ за цикл даст движение некоторым механизмам, соединенным с поршнем.

Чтобы снизить температуру рабочего тела без отвода теплоты из системы, необходимо заключить цилиндр в теплонепроницаемую оболочку и предоставить рабочему телу возможность расширяться. После завершения процесса, протекающего без теплообмена с окружающей средой и называемого адиабатным, температура газа понизится; его сжатие потребует совершения меньшей работы, чем было получено при расширении на первой стадии. Адиабатное расширение должно происходить до тех пор, пока температура рабочего тела не станет равной температуре холодильника. После этого приведем рабочее тело в контакт с холодильником

и осуществим квазистатически изотермическое сжатие при температуре, на бесконечно малую величину отличающуюся от температуры холодильника. Теплота, получаемая при этом за счет сжатия, будет передаваться холодильнику, температура которого будет оставаться неизменной вследствие его бесконечной теплоемкости. Завершающий процесс цикла - адиабатное сжатие рабочего тела до тех пор, пока его температура не станет равной температуре нагревателя. Давление при этом также достигнет первоначального значения.

Описанные выше четыре процесса образуют цикл, известный в термодинамике под названием *цикла Карно*. Тепловая машина, работающая по описанному циклу, сможет, как утверждал Карно, произвести максимум работы при прочих равных условиях. Процессы, составляющие цикл Карно, являются наиболее эффективными при преобразовании теплоты в работу. Выброс некоторого количества теплоты в холодильник при работе тепловой машины неизбежен: только этой ценой можно получить работу из теплоты. Следовательно, в машине Карно полностью превращается в работу теплота, равная разности количеств теплоты, взятой у нагревателя и отданной холодильнику. Отметим, что максимум работы можно получить лишь в том случае, если процессы цикла осуществлять квазистатически. Поясним это более подробно.

После того как цилиндр приведен в контакт с нагревателем, на поршень начинает действовать сила давления со стороны рабочего тела. Поршень, переместившись на некоторое расстояние, образует разрежение в непосредственной близости от его внутренней поверхности. Давление газа на поршень становится меньше того, которое было бы при этом же перемещении поршня, если бы в цилиндре установилось внутреннее равновесие. Если рабочему телу не дать времени для выравнивания давления во всем объеме, то выполненная работа, равная произведению давления газа на изменение его объема, будет меньше, чем в том случае, когда после бесконечно малого перемещения будем давать системе возможность прийти в равновесное состояние. Таким образом, максимальная работа расширения будет произведена при условии, если процесс осуществляется бесконечно медленно, без заметного отклонения системы от равновесного состояния.

При изотермическом сжатии наблюдается следующее. Внешними силами будем действовать на поршень, сжимая газ при температуре, равной температуре холодильника. Незначительное перемещение поршня вызовет уплотнение слоя газа, прилегающего к внутренней стенке поршня. Давление непосредственно под поршнем будет большим, чем давление в остальных точках объема цилиндра. Если сжатие производить так медленно, что давление, создаваемое в цилиндре движущимся поршнем, будет успевать выравниваться по всему объему, то потребуется меньшее усилие, чтобы вернуть поршень в исходное состояние, следовательно, будет совершена меньшая работа сжатия. Значит, для получения максимума работы за счет теплоты в машине Карно необходимо не только расширение, но и сжатие рабочего тела осуществлять как можно медленнее, не допуская значительных отклонений системы от состояния равновесия. Все другие циклы, осуществляемые каким-угодно образом, дадут значительно меньший экономический эффект.

После того как был детально рассмотрен полный цикл работы теплового двигателя, Карно приводит описание обратного цикла. Если результатом описанных выше операций было получение определенной "движущей силы" и перенос теплорода от нагревателя к холодильнику, то результатом обратных операций будет затрата полученной движущей силы и возвращение теплорода от холодильника к нагревателю. При этом эффективность обеих операций будет одинаковой: обе операции нейтрализуют одна другую.

В обратном цикле происходит перенос теплоты от холодильника к нагревателю за счет работы внешнего источника энергии. При этом температура холодильника снижается, а температура нагревателя повышается. Многократно осуществляя циклы в обратном направлении, можно добиться значительной разности температур между нагревателем и холодильником. Обратный цикл Карно в настоящее время широко используется в холодильных установках. Здесь следует напомнить, что если создание тепловых машин содействовало развитию теории тепловых явлений, то создание их теории способствовало возникновению и становлению холодильной промышленности.

Значительная часть работы Карно посвящена математическим расчетам. Однако не все выполненное

автором равноценно. Часть полученных им результатов отличается от действительных тем, что используемые им экспериментальные данные ряда исследователей, которые он положил в основу своих расчетов, были ошибочными. Но важно не только то, как вычислял Карно. Более важно было то, что именно он пытался вычислить. Исследуя вопрос о теплоемкостях при постоянном давлении и постоянном объеме, он пытался установить соотношение между ними, в существовании которого он был убежден. Путем ряда предположений и допущений Карно получил результат, из которого следовало, что разность между теплоемкостями одна и та же для всех газов. Правда, этот верный результат был получен с использованием гипотезы теплорода. Позже связь между теплоемкостями была установлена Майером более корректно и уравнение, выражающее эту связь, получило название уравнения Майера.

Большой интерес представляет исследование им количественной стороны процесса взаимопревращения теплоты и работы. Используя данные экспериментов, Карно проводит вычисления произведенной работы при получении от нагревателя единицы теплоты. Это значение он рассчитал для трех агентов: воздуха, водяного пара и спирта. Для всех трех веществ, относя полученные данные к одному участку термометрической шкалы, он нашел соответствующие значения. Работу, произведенную рабочим телом при сообщении ему единицы теплоты, Карно определял, вычисляя отношение работы, полученной при переходе некоторого количества теплоты от нагревателя к холодильнику, к теплоте, полученной от нагревателя. При этом температурный интервал $t_1 - t_2$ он принимал равным единице. Как следует из его расчетов, это отношение практически не зависит от природы используемого агента, а является только функцией температуры. Карно нашел, что

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{\Delta t}{C},$$

КПД

где η - КПД машины; A - произведенная работа; Q - теплота, полученная от нагревателя; Δt - температурный интервал, в расчетах Карно равный единице. Следовательно, это

отношение определяется только неизвестной функцией температуры ($C = f(t)$), получившей название *функции Карно*. Из его расчетов следовало также, что $1/C$ с ростом температуры падает, следовательно, собственное значение функции Карно возрастает с ростом температуры. Установить вид этой функции он не смог, хотя и предпринимал неоднократные попытки в этом направлении. Если бы ему удалось найти вид этой функции, он, без сомнения, смог бы получить математическое выражение для КПД теплового двигателя, что дало бы возможность вычислить механический эквивалент теплоты. К сожалению, этого не произошло: предложенный им вид функции был найден другими учеными (Томсон, Клаузиус и др.), которые продолжали развивать его идеи.

Дальнейшие исследования в области термодинамики показали, что функция Карно представляет собой не что иное, как абсолютную температуру, т. е.

$$C = T = t + 273^{\circ}.$$

Абсолютная температура

С учетом этого формулу для КПД теплового двигателя, работающего в температурном интервале

$$\Delta T = T_1 - T_2,$$

температурном интервале

отличном от единицы, можно записать в виде

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

КПД теплового двигателя

где A - работа, совершаемая тепловой машиной, затратившей Q единиц теплоты; T_1 , и T_2 - абсолютные температуры нагревателя и холодильника соответственно.

В последующих главах Карно рассматривает вопрос получения движущей силы с использованием твердых тел в качестве рабочего тела. Возможно, пишет автор,

последовательно нагревая и охлаждая, например, железный стержень, получать изменения его объема, а следовательно, и развивать "движущую силу". Однако в этом случае вследствие изменения объема не происходит изменения температуры. Для того чтобы добиться этого, необходимы огромные усилия, действующие на твердые тела. Поэтому, утверждает Карно, наиболее подходящим агентом для получения движущей силы является пар или газ. Они отвечают всем условиям, предъявляемым к рабочему телу: легко сжимаются и почти неограниченно расширяются; изменение их объема вызывает значительные изменения температуры; они подвижны, легко нагреваются и охлаждаются. Необходимые условия для наиболее эффективной работы теплового двигателя Карно формулирует в виде трех принципов:

1. температура газа должна быть первоначально как можно выше, чтобы получить большие падения теплорода и отсюда значительное развитие движущей силы;
2. по той же причине охлаждение должно быть как можно больше;
3. переход упругой жидкости от наиболее высокой температуры к наиболее низкой должен происходить от увеличения объема, т. е. охлаждение газа должно происходить самостоятельно от его расширения.

Указав пути повышения КПД, Карно не ограничился этим. В последующем изложении он конкретизирует высказанные им принципы, фактически развивая вышеизложенное. "Предел температуры, до которой можно первоначально довести газ, - пишет ученый, - это температура, развиваемая при сгорании; она очень высока. Предел охлаждения - это температура наиболее холодных тел, которыми можно легко располагать и в большом количестве: этим телом обычно является вода окружающей местности. Что касается третьего условия, то оно мешает развитию движущей силы тепла при больших разностях температуры, мешает использовать большие падения теплорода. В самом деле, тогда газ должен благодаря расширению перейти от очень высокой температуры к очень низкой; это требует большого изменения объема и плотности, а это в свою очередь - чтобы газ был первоначально взят при очень высоком давлении или достиг бы расширением колоссального объема. Оба условия трудновыполнимые. Первое делает необходимым употребление очень крепких сосудов для содержания газа, находящегося одновременно

при сильном давлении и высокой температуре; второе - весьма больших сосудов".

Дальнейшие рассуждения Карно касаются практических вопросов относительно работы паровых машин. Он рассматривает их конструктивные особенности, раскрывает недостатки того или иного устройства и указывает пути их устранения. Характеризуя рабочее тело, используемое в тепловых машинах, Карно приходит к выводу, что наилучшими агентами должны быть водяной пар и атмосферный воздух. Здесь же ученый проводит их сравнение, отмечая преимущества и недостатки одного агента перед другим. Он утверждает, что воздух имеет важное преимущество перед водяным паром, заключающееся в том, что при одинаковом объеме воздух имеет значительно меньшую теплоемкость. Это свойство позволяет при одном и том же изменении объема достичь наибольшего изменения его температуры, что выгодно сказывается на эффективности работы тепловой машины. Кроме того, атмосферный воздух можно нагревать непосредственно сгоранием топлива, происходящим в нем. Этим самым можно избежать больших потерь теплоты, что также не может не сказаться на КПД. Другие газы лишены этого преимущества. Их теплоемкость больше чем у воздуха. Чтобы дать воздуху возможность значительного расширения и тем самым вызвать большие изменения температуры, развивает далее свою мысль Карно, необходимо использовать его в начале цикла при достаточно высоком давлении, чего можно добиться, используя пневматический насос. Затем он высказывает важное предположение: тепловые машины, использующие в качестве рабочего тела воздух, могут работать без охлаждающего тела, выпуская воздух в атмосферу. Однако в этом случае расширение должно быть ограниченным, чтобы давление воздуха под поршнем оставалось все время выше атмосферного.

Учитывая свойства агентов, Карно предлагает при низких температурах нагревателя в качестве рабочего тела использовать пар, при высоких - воздух. При этом отработанный воздух не следует выбрасывать в атмосферу: его можно использовать для подогрева воды в котле, что тем самым даст экономию топлива. Как инженер, Карно предвидит трудности, возникающие на пути конструкторов, которые решат воспользоваться его советами. Поэтому, завершая анализ свойств агентов, пригодных для работы тепловой

машины, Карно пишет: "Употребление атмосферного воздуха для развития движущей силы на практике представит огромные трудности, но, может быть, не непреодолимые; если их удастся победить, то воздух обнаружит большие преимущества перед водяным паром. Что касается других постоянных газов, то они должны быть совсем отброшены: они имеют все недостатки атмосферного воздуха, не обладая ни одним из его преимуществ. То же можно сказать и по отношению к водяному пару. Если бы нашлось в большом количестве жидкое тело, испаряющееся при более высокой температуре, чем вода, - тело, пар которого при том же объеме имел бы меньшую теплоемкость, не действовал бы на металлы, идущие на постройку машины, то оно заслуживало бы предпочтение; но природа не дает нам подобного тела".

Следует отметить, что Карно не только утверждает, но и дает подробные пояснения своим высказываниям. Проведенный им анализ настолько глубок, что даже спустя более чем 150 лет после выхода из печати этой работы нет необходимости что-либо изменять или добавлять к вышеизложенному.

Завершает автор свою работу расчетом КПД существующих в его время паровых машин. В качестве примера он выбирает самую лучшую из работающих машин, которая применялась на медных рудниках в Англии. И вот для этой самой производительной машины Карно подсчитывает значение КПД, равное всего лишь 5%. Для старых, наиболее распространенных машин эта цифра, указывает автор, должна быть снижена в 10 раз, т. е. составлять всего лишь 0,5%.

В заключение своей работы Карно высказывает предостережение ученым и конструкторам тепловых машин, которые едины в своем стремлении повысить коэффициент полезного действия создаваемых ими машин во что бы то ни стало. Именно к ним обращены последние фразы его "Размышлений...": "Нельзя надеяться хотя бы когда-либо практически использовать всю движущую силу топлива. Попытки, сделанные для приближения к этому результату, будут, скорее, вредными, чем полезными, если они заставят забыть другие важные обстоятельства. Экономия топлива - это лишь одно из условий, которое должны выполнять тепловые машины; при многих обстоятельствах оно второстепенно, оно часто должно уступать первенство надежности, прочности и

долговечности машины, мало занимаемому месту, дешевизне ее установки и т. д. В каждом случае суметь использовать должным образом удобство и экономичность, отделить наиболее важные условия от второстепенных, подходящим образом их сбалансировать, чтобы с наиболее простыми средствами достигнуть наилучших результатов, - таковы должны быть основные способности человека, призванного управлять и приводить в согласие между собой работы себе подобных, чтобы заставить их действовать для какого-либо полезного дела".

Как показало дальнейшее развитие теории тепловых машин, выводы, к которым пришел Карно, оказались весьма значительными и образовали фундамент заложенного им здания термодинамики. Работы Томсона и Клаузиуса явились продолжением исследований в этой области. Основным результатом работы Карно (теплота сама собой не может переходить от холодного тела к горячему или, как сказано в приведенном отрывке, "нельзя надеяться хотя бы когда-либо практически использовать всю движущую силу топлива") является одним из главнейших законов природы, который в работах его последователей получил название *второго начала термодинамики*. *Первое начало термодинамики* - закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам - было открыто Р. Майером спустя 20 лет после публикации Карно. Но и здесь есть небольшая историческая неточность.

Результаты дальнейших научных исследований

Очень грустную историю, главным действующим лицом которой был Сади Карно, рассказал его соотечественник, крупный французский физик Л. Бриллюэн. Многие известные ученые, сообщает он, высказывают свое неудовольствие тем, что Карно установил второе начало термодинамики до того, как было установлено первое. Заблуждение этих ученых вполне объяснимо: они не были знакомы со второй публикацией Карно, появившейся более чем через 100 лет после первой, в 1927 г.

Как уже отмечалось в биографии ученого, после смерти все его личные вещи, включая и бумаги, были уничтожены в соответствии с положением того времени. Случайно избежала этой участи записная книжка, которая после смерти ее

владельца была передана брату ученого, который хранил ее как дорогую реликвию в своей библиотеке. Но слава, которой ученый был лишен при жизни, росла по мере развития и становления термодинамики. Все, что касалось научного исследования С. Карно, вызывало живейший интерес у ученых, работавших в созданной им области. И вот через 46 лет после смерти ученого его брат вспомнил о записной книжке и в 1878 г. передал ее Французской Академии наук. В этом же году основная работа Карно была переиздана с добавлением биографических сведений об ученом, сообщенных его братом, и отдельных выдержек из записной книжки ученого. Только в 1927 г., когда с большим опозданием отмечалось столетие со дня выхода "Размышлений..." из печати, было издано наиболее полное научное наследие ученого. Новое издание включало в себя "Размышления...", биографические сведения об ученом и полное изложение содержания записной книжки с приложением фотокопии оригинала.

Однако и эта публикация не произвела должного впечатления в ученом мире. Да и что значили научные сведения столетней давности! Если бы эта книга была выпущена своевременно, то высказывавшие недовольство физики, о которых шла речь выше, были бы полностью удовлетворены: в записных книжках Карно содержалась формулировка и первого начала термодинамики. В записях, четких и недвусмысленных, изложены его воззрения на природу теплоты и ни слова не сказано о теплороде. В противовес прежним воззрениям здесь утверждается, причем не голословно, что теплота представляет собой не что иное, как движение молекул; работа, полученная с использованием тепловой машины, эквивалентна затраченному количеству теплоты; приведено значение механического эквивалента теплоты. Рассмотрим кратко содержание этой запоздалой публикации.

Записи своих мыслей и наблюдений Карно вел, по-видимому, сразу же после издания "Размышлений..." и до последних дней. Их содержание относится только к одной области знаний - к термодинамике, т. е. касается взаимоотношений и взаимопревращений теплоты и работы. Французский комментатор Раво, разбирая эти записи, установил некоторую систему в них, рассортировав все записанное по девяти разделам.

Первый раздел включает заметки Карно по вопросу природы теплоты. Здесь дано описание опытов Румфорда и Дэви и ряд других менее известных фактов. Любопытно, что уже в это время Карно описывал опыты по расширению газов в атмосферу, что, по мнению ученого, должно приводить к понижению температуры газа. Эти опыты были позже осуществлены английским ученым Дж. Джоулем и его соотечественником У. Томсоном, причем результаты их совпали с теми, которые предсказывал Карно. Описание этих опытов Карно заканчивает утверждением: "Таким образом, теплота создана движением. Если она вещество, то надо допустить, что вещество создано движением. А так как с этим согласиться невозможно, то представление о теплоте как об особом веществе нужно отбросить. Если гипотеза недостаточна для объяснения явления, она должна быть оставлена. В таком положении находится гипотеза, по которой теплород рассматривается как вещество, как неуловимая жидкость".

В заключение этого раздела Карно приводит собственные предположения о природе теплоты. Исходя из работ по лучистой теплоте, он приходит к выводу, что теплота является результатом колебательного движения молекул. "Тепло может представлять собой колебательное движение молекул. Если это так, - развивает свою мысль автор, - то количество тепла - это не что иное, как та механическая энергия, которая необходима, чтобы привести молекулы в колебательное движение. Тепло является движением..."

Во втором разделе Карно формулирует ряд вопросов, которые могут быть объяснены с позиции новой теории. Здесь и вопрос о переходе вещества" из одного агрегатного состояния в другое, и вопрос о причине выделения теплоты при сжатии газов, и др. Третий раздел включает в себя рассуждения автора о взаимопревращении теплоты и работы. Результаты, к которым пришел Карно в эти годы, были установлены только спустя 15 лет после его смерти. Он отчетливо представлял закон сохранения и превращения энергии, что чувствуется по тому, как он формулирует свои мысли: "Всюду, где имеется разрушение движущей силы в частицах тела, - пишет Карно, - имеется в то же время производство теплоты в количестве, точно пропорциональном количеству уничтоженной движущей силы; взаимно, повсюду, где имеется уничтожение теплоты, имеется производство движущей силы... Можно взять как общий тезис, что, по

правде говоря, она никогда не производится и не разрушается. В действительности она изменяет форму, то есть производит то один вид движения, то другой, но никогда не уничтожается". Приведенная цитата вряд ли требует пояснений. Все, кто изучает физику, без труда догадаются, что в этом отрывке вполне корректно и четко дана формулировка одного из основных положений физики, известного под названием закона сохранения и превращения энергии, или, в приложении к термодинамике, ее первого начала.

В этих же заметках Карно приводит значение механического эквивалента теплоты. По его расчетам, это значение в современных единицах равно 370 кГм/ккал , что в общем-то незначительно отличается от числа, принятого в настоящее время ($427 \text{ кГм/ккал} \approx 4189 \text{ Дж/ккал}$). Как удалось ученому определить ее, остается загадкой. В заметках нет никаких указаний по этому поводу. Возможно, эти расчеты основывались на данных об отношении удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Бриллюэн утверждает, что расчеты Карно по установлению числового значения механического эквивалента теплоты основаны на опытах по диффузии газов. Но так или иначе Карно первым из ученых в своих заметках сформулировал один из фундаментальных законов природы - закон сохранения и превращения энергии, который в термодинамике получил название ее первого начала. Он был известен ученому за 15 лет до того, как появились работы Майера, Джоуля и других исследователей.

В остальных шести разделах Карно намечает опыты, которые он планирует осуществить для подтверждения механической теории теплоты и определения механического эквивалента теплоты. Ряд опытов, намечаемых им, представляет собой повторение опытов Румфорда, но при осуществлении их Карно предполагал измерить не только полученную теплоту, но и совершаемую при этом работу. Эти результаты дали бы возможность экспериментально установить значение механического эквивалента теплоты. Некоторые из описанных опытов совпадают с проделанными Джоулем: опыты по взбалтыванию воды в сосуде с одновременным измерением полученной теплоты и затраченной механической энергии. Поразительные способности С. Карно являются предметом восхищения

современников и потомков. Завидная удача выпала на его долю. Он не только основал новую отрасль знаний, не только заложил фундамент, но и почти полностью построил здание термодинамики, предоставив другим ученым только его отделку.

Глава III. Клапейрон и его вклад в развитие термодинамики

Биографические сведения

Продолжателем работ С. Карно по теории тепловых машин был его соотечественник инженер-строитель Б. Клапейрон. *Бенуа Поль Эмиль Клапейрон* родился в Париже 26 января 1799 г. О его родителях известно лишь то, что записано им в послужном списке: "недвижимой собственностью не владели". В 1816 г., завершив среднее образование в одном из лицеев Парижа, Клапейрон поступает в Политехническую школу, которую двумя годами раньше окончил С. Карно. В 1818 г., после получения специальности военного инженера, Клапейрон приступает к работе во Французском горном корпусе в должности инженера-ученика и одновременно посещает занятия в Минной школе. В 1819 г. он, выполняя обязанности горного инженера, вместе со своим другом Габриэлем Ламе, тоже выпускником Политехнической школы, совершает поездку по Гарцу. Маршрут был выбран не случайно. В те годы этот горный район представлял собой богатую кладовую полезных ископаемых - меди, серебра, цинка, свинца и др. При разработке месторождений наряду с ручным трудом широко использовались технические усовершенствования. Именно это привлекло внимание начинающих исследователей.

Во время этой поездки молодые специалисты познакомились с рудниками и шахтами, машинами и механизмами, обслуживающими эти предприятия, вникали во все детали горнорудного производства. Это была не экскурсия, а творческая инженерная работа. Результатом этой поездки явились первые публикации Клапейрона, одна из которых была посвящена зубчатым колесам, другая - описанию парохода. Заметим, что тематика первых работ ученого очень близка той, которой он посвятил всю свою жизнь.



Б. Клапейрон

После возвращения молодые исследователи были представлены генералу русской службы П. П. Базену, который пригласил их в качестве преподавателей в Петербургский институт инженеров путей сообщения. Колебаний почти не было. Широкие возможности для применения полученных знаний, желание познакомиться с далекой неизвестной страной побеждают: Клапейрон и Ламе дают согласие на поездку в Россию. Указ об их назначении на русскую службу был издан 20 июня 1821 г.

Педагогический коллектив института представляли в основном выпускники Петербургского и иностранных университетов. Однако в преподавательских кадрах постоянно ощущался недостаток. Это можно объяснить тем, что молодые преподаватели и подающие надежды инженеры-выпускники назначались руководителями строительных работ в различных уголках России и надолго, а то и навсегда оседали там. Пополнение кадров осуществлялось за счет приглашенных зарубежных ученых - из Германии и Франции. Особенно высок был авторитет выпускников Политехнической школы.

Качество подготовки специалистов в институте было поставлено достаточно высоко. Значительная часть программы была посвящена элементарной и высшей математике, механике, гидравлике, начертательной геометрии и статистике. Важным разделом учебных программ был, курс

основ строительного дела. Обязательным для выпускников считалось умение составлять проекты и сметы работ.

По прибытии в Россию Клапейрону было поручено заведование кафедрами механики и химии. Свою работу в институте Клапейрон начал с разработки порученных ему курсов. К уже существующим разделам механики он добавил новые - о паровых машинах, ветряных мельницах и др. Учитывая важность прикладного значения механики, Клапейрон разделил читаемый им курс на два: прикладную и рациональную (теоретическую) механику. Таким образом, он был первым лектором в России, читавшим эти курсы в отдельности. Аналогичное деление (на прикладную и теоретическую) он осуществил и в химии.

В 1827 - 1828 гг., кроме разработки и чтения лекций по механике и химии, Клапейрон руководил проектами выпускников и читал лекции по астрономии. В 1829 - 1830 гг. совместно с Ламе он организовал курс "Новые открытия и усовершенствования в художествах, относящиеся до предметов, преподаваемых в институте". Не менее важным был разработанный им курс построений (инженерная графика), прочитанный в этом же году. Кроме обязательных, Клапейрон и Ламе пытались организовать чтение публичных лекций, но организация этого мероприятия продвигалась с большим трудом и завершилась успешно только в 1830 г.

Преподавательскую деятельность Клапейрон успешно совмещал с научными изысканиями. В петербургский период жизни он много внимания уделял строительству мостов из различных материалов, углублению рек и каналов, сооружению шлюзов, изысканию новых систем водных коммуникаций и другим инженерным вопросам.

В дополнение к существующим нагрузкам ему как руководителю кафедры химии было поручено изучить свойства известей русских месторождений с целью их применения в строительстве. Клапейрон провел тщательные исследования, результаты которых были положительными: оказалось, что русские извести ни в чем не уступают привозным. К вопросу о свойствах известей из различных месторождений Клапейрон неоднократно возвращался в последующие годы. Под его руководством были проведены первые испытания бетона, изготовленного в России, и

осуществлено его первое применение для строительства опор моста. Клапейрон был членом многих комиссий по изучению проектов и смет, рецензировал изобретения и усовершенствования. Он не только рассматривал проекты, представленные в комиссию, но и сам много и плодотворно занимался проектированием.

В конце 1825 г. в связи с развитием конструкций ценных мостов Клапейрону были поручены испытания прочности русского железа, которое шло на изготовление цепей. Эти испытания также прошли успешно и доказали пригодность русского металла для строительства мостов. Следует отметить, что все поручаемые ему исследования Клапейрон проводил очень добросовестно в противовес другим иностранным специалистам, работавшим в России, которые были заинтересованы в выгоде зарубежных фирм, снабжавших Россию сырьем и готовой продукцией. Руководители различных министерств и ведомств всегда очень высоко отзывались о научной компетенции Клапейрона. В знак признания научных заслуг Клапейрон был избран членом-корреспондентом Петербургской Академии наук, награжден орденами.

Период пребывания Клапейрона в России был очень плодотворным для ученого. В эти годы им было опубликовано свыше десятка работ, получивших достойную оценку и признание современников. В числе этих работ следует выделить такие, как "Об устройстве сводов" (1826), "О построении веревочных многоугольников" (1827), "О приложении статики к решению задач, входящих в теорию наименьших расстояний" (1827). Именно в России Клапейрон сформировался как исследователь, здесь он проявил себя как опытный инженер и знающий наставник. Россия действительно предоставила ему огромные возможности для приложения и развития его способностей.

Может сложиться впечатление, что вся жизнь Клапейрона в России - это неизменное движение вверх по служебной и академической лестницам. В действительности это совсем не так. Иначе трудно объяснить резкое изменение в отношении к нему со стороны царского двора и административного аппарата, последовавшее в 1830 г., которое привело в конце концов к тому, что Клапейрон и Ламе вынуждены были в 1831

г. покинуть Россию. Причину их внезапного отъезда сейчас трудно установить.

Оба ученые, и Клапейрон, и Ламе, как уже упоминалось, происходили из семей, не владевших недвижимой собственностью. Люди, выросшие и сформировавшиеся в бурные революционные годы, не могли не иметь передовых взглядов, созвучных эпохе. Это было известно тем, кто должен был следить за развитием революционных событий в Европе и пресекать распространение крамолы в России. Ученых неоднократно предупреждали на недопустимость высказываний по поводу Июльской революции 1830 г. Однако воспитанные в свободном духе, имея независимый характер, они не считали нужным подбирать выражения, высказывая свои политические убеждения, и бурно выражали горячее одобрение молодой республике.

Это непослушание стоило им очень дорого, особенно Клапейрону. В конце 1830 г. он срочно командировается в Вытегру. Сроки командировки предусматривали его возвращение не ранее лета 1831 г. Такая длительная командировка среди профессорского состава была исключением. Ссылки на слабое здоровье и незнание языка, на суровый климат места назначения и его удаленность не смогли предотвратить эту поездку. Надо полагать, что этот акт был ответным ходом на вольнодумство и непослушание Клапейрона.

Возвратившись в 1831 г. из командировки, Клапейрон с начала 1831/32 учебного года продолжил свою преподавательскую деятельность. Но вскоре совершенно неожиданно для окружающих Клапейрон и Ламе, ссылаясь на нездоровье, подали заявление об отставке. К всеобщему удивлению, отставка была принята незамедлительно. Удивляться такому обороту дела были причины. Попытка ученых возвратиться на родину была предпринята впервые в 1824 г., но тогда их прошение даже не рассматривалось. Подобные попытки, предпринимаемые позднее, также получали неизменный отказ. Но теперь терпение царских чиновников вдруг иссякло. По всему видно, что на этот раз от них просто решили избавиться, и как можно скорее, опасаясь их революционного духа.

По возвращении на родину Клапейрон продолжал заниматься инженерной деятельностью, в первую очередь строительством мостов и дорог. Не оставил он занятий и по разработке и усовершенствованию лекционных курсов. Особенно много внимания Клапейрон уделял курсу "Паровые машины", так как в те годы железнодорожный транспорт все увереннее входил в жизнь.

Дальнейшая жизнь и научное творчество Клапейрона посвящены железнодорожному транспорту. Это было время, когда развивающийся капитал нуждался в железных дорогах и имел средства, чтобы интенсифицировать их строительство.

Клапейрон руководил строительством железной дороги Париж - Сен-Жермен, Бордо - Байона. Одновременно ему приходилось проектировать и руководить строительством мостов через Сену, Гарону и другие реки. Он постоянно совершенствовал их конструкции, разрабатывал простые методы расчета, которые впоследствии были приняты на вооружение всеми инженерами-мостостроителями. Клапейрон являлся бессменным консультантом различных обществ и компаний, занимающихся строительством мостов и крупных железных дорог.

В 1858 г. заслуги Клапейрона в инженерном строительстве были официально признаны: его избрали членом Французской Академии наук. Как и в России, он занимал посты в различных комиссиях и комитетах академии. За активное участие в работе промышленных обществ и за большой вклад в науку он был неоднократно награжден и премирован.

Клапейрон на протяжении всей жизни продолжал интересоваться теорией паровых машин. Им написана важная работа о регулировании пара в паровых машинах (1842). В 1844 г. он был назначен профессором Школы мостов и дорог, где продолжал читать созданный им курс "Паровые машины".

До последних дней Клапейрон был связан с Россией. В своих печатных трудах он не раз высказывал высокую оценку системе подготовки, принятой в Институте путей сообщения. Русские инженеры, бывая в Париже, встречались с ним, обсуждали инженерные идеи, советовались, консультировались. Библиотека института регулярно получала оттиски работ Клапейрона и литографированные издания читаемых им курсов.

В 1859 г. Клапейрон был приглашен в Петербург на юбилей института. Но шестидесятилетний ученый, поблагодарив за приглашение, не поехал на празднества, сославшись на длительность путешествия и слабость здоровья.

Умер Клапейрон шестидесяти пяти лет (28 января 1864 г.) в Париже. В память о заслугах перед нацией одна из улиц Парижа названа его именем.

По воспоминаниям современников, Клапейрон пользовался в среде коллег признанием как крупный ученый и думающий инженер. Но более всего, отмечают они, в ученом покоряли доброта, проявляющаяся в отношениях с людьми, его отзывчивость, научная честность и добросовестность. Это снискало ему не меньшую славу, чем все его научные труды и инженерные изыскания.

"Размышления о движущей силе огня..."

Роль Клапейрона в создании термодинамики в большинстве работ по истории естествознания представляется скромной. Общепринятым считается мнение, что в области термодинамики им только установлен вид уравнения состояния идеального газа и получено уравнение фазового перехода, обобщенное впоследствии Клаузиусом. Обычно его имя упоминается в связи с исследованиями Карно, причем единодушно утверждается, что в своей работе Клапейрон лишь пересказал идеи Карно, графически проиллюстрировав их. Однако такое отношение к научному творчеству французского ученого не соответствует действительности. Результаты, полученные Клапейроном в области термодинамики, далеко не ординарны. Его вклад в эту область знаний весьма существен. Установленное им уравнение играет очень важную роль в различных термодинамических расчетах. Эти уравнения можно поставить в один ряд с законами Кеплера в небесной механике или с законом Ома в электричестве.

Широко распространенное мнение о второстепенной роли Клапейрона в развитии термодинамики сложилось под влиянием ряда случайных факторов. Прежде всего следует отметить, что еще в начале "Размышлений..." сам Клапейрон предупреждает читателей, что цель данной работы - развитие идей Карно. Неоднократно ссылаясь в своих рассуждениях на

работу Карно, он не проводит четкой границы между собственными результатами и результатами, к которым пришел его предшественник. Более того, название работы Клапейрона почти совпало с названием работы Карно. С учетом этого понятно, почему европейские физики, которые знакомились с идеями Карно не по публикациям автора, а по работе Клапейрона, имели некоторые основания утверждать, что "Размышления..." Клапейрона всего лишь добросовестное переложение идей своего соотечественника. К этому иногда снисходительно добавляют, что Клапейрон пересказал идеи Карно, математически и графически обработав их. В последующем изложении попытаемся непредвзято подойти к оценке научного творчества Клапейрона в области термодинамики и четко выделить все то новое, оригинальное, что содержится в его работе, посвященной исследованию тепловых процессов.

Как уже отмечалось, Клапейрон много лет с увлечением занимался подготовкой лекционного курса "Паровые машины". При очередной переработке этого курса он обратился к источникам соответствующей тематики, изданным в годы его работы в России. Вполне естественно, что в число этих источников попала и работа Карно¹. Детально ознакомившись с ее содержанием, Клапейрон сумел понять главную мысль автора. Идеи, высказанные Карно, увлекли его. Для того чтобы наглядно представить ход рассуждений автора, Клапейрон разработал графический метод изображения термодинамических процессов.

¹ (Имеется предположение, что Клапейрон был лично знаком с Карно)

Графический метод изображения процессов, осуществляющихся в газах, не только позволял наглядно представить характер изменения параметров, описывающих состояние исследуемого газа, но и давал возможность применить математические приемы для расчета эффективности того или иного процесса или цикла. Последний фактор особенно важен потому, что Клапейрон был великолепным математиком, свободно владеющим аппаратом дифференциального и интегрального исчисления.

Объем работы Клапейрона небольшой: в немецком издании В. Оствальда, в серии "Классики точного знания", она представлена на 38 страницах и состоит из восьми глав,

каждая из которых может рассматриваться как вполне самостоятельное исследование.

В первой главе содержится материал, который вводит читателя в курс дела. Здесь же сформулирована проблема, которую собирается решить автор. Основное внимание Клапейрон обращает на значимость фактов, вытекающих из экспериментальных исследований свойств газов. Хотя для газов, пишет он, найдены законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, связывающие его параметры в различных состояниях, и точность этих законов не вызывает сомнений у ученых, однако, продолжает автор, до сих пор ничего неизвестно о том количестве теплоты, которым обладает газ, находящийся в определенном состоянии, и которое освобождается из него при различных процессах. Кроме того, из этих законов невозможно получить количественное отношение удельной теплоемкости газа при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме.

Вполне понятно, что в первую очередь Клапейрона интересовали экспериментальные факты, посвященные исследованию тепловых свойств газа, так как именно знание этих свойств способствовало бы отысканию путей повышения эффективности действия паровых машин. Поиск этих путей и составлял главную цель инженеров и ученых того времени.

Прежде всего Клапейрон отмечает уязвимость исследований П. Лапласа и С. Пуассона по тепловым свойствам воздуха, так как в их рассуждениях совершенно бездоказательно принимается за основу положение, согласно которому при данной температуре отношение изобарной теплоемкости к изохорной одинаково для всех газов и значение этого отношения есть неизвестная функция температуры, вид которой и требуется установить.

Клапейрон правильно понял основную мысль рассуждений Карно. Из всего содержащегося в работе Карно он выделил, по его мнению, наиболее важное:

1. если газ при некотором значении давления и объема перейдет без изменения температуры в состояние с новыми значениями объема и давления, то полученное или отданное при этом количество теплоты не зависит от природы исследуемого газа;

2. различие между удельной теплоемкостью при постоянном давлении и удельной теплоемкостью при постоянном объеме одинаково для всех газов;
3. при изменении объема газа без изменения температуры количество теплоты, отданное или полученное этим газом, составит арифметическую прогрессию, если объем газа будет изменяться в геометрической прогрессии.

Клапейрон отмечает, что существует возможность математически подтвердить справедливость вышесказанного. "Этот новый аргументированный метод, - пишет он по этому поводу, - по моему мнению, заслуживает внимания математиков. Я полностью подтверждаю его безупречность и считаю, что, пользуясь этим методом, можно получить важные результаты". Далее Клапейрон продолжает обсуждение основных положений, содержащихся в работе Карно, отмечая при этом, что именно они будут исходными в его последующих рассуждениях.

Прежде чем излагать рассуждения Клапейрона, заметим, что он безоговорочно принял представления Карно о вещественной природе теплоты: как и Карно, Клапейрон в своей работе оперирует теплородом, считая, что при различных процессах в газах количество теплорода остается постоянным.

Как и у Карно, движущая сила, по Клапейрону, развивается в том случае, если теплород переходит от одного горячего тела к другому, холодному, количественно при этом не изменяясь. Правда, он, как и Карно, понимает слабое место в своих рассуждениях: вещественная теория теплоты не всегда соответствует теоретическим представлениям, развиваемым им. Термин "движущая сила" у Клапейрона, как и у Карно, соответствует механической энергии, или произведенной работе.

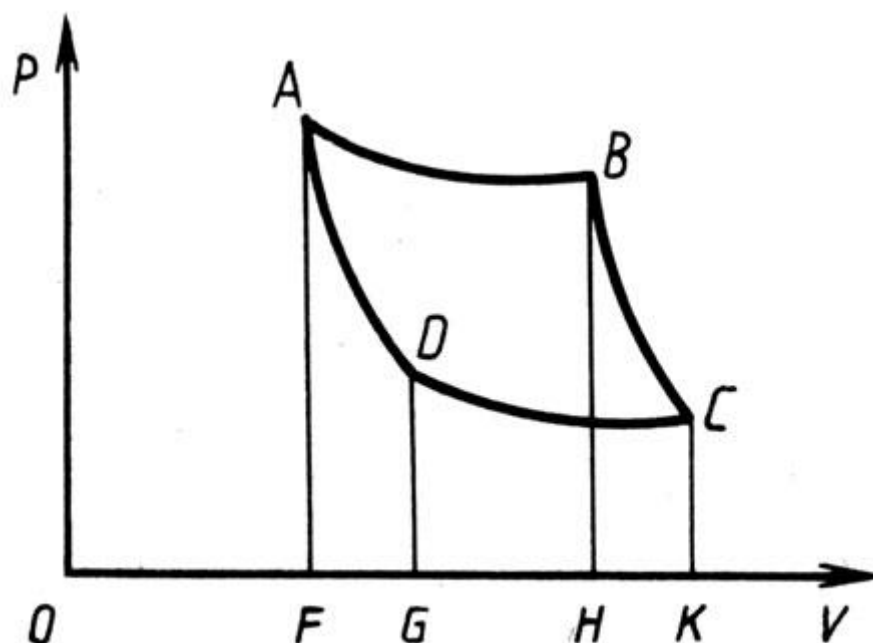


Рис. 6. В осях p - V изображается цикл, предложенный Карно

В самом начале второй главы Клапейрон излагает мнение Карно о том, что в паровой машине возможен не только прямой процесс - получение движущей силы за счет перехода теплорода от горячего тела к холодному, но и обратный - перенос теплоты от холодного тела к горячему за счет работы, произведенной внешними силами. Далее он выделяет наиболее существенный момент рассуждений Карно: максимальная работа совершается в том случае, когда передача теплоты от одного тела к другому совершается при одинаковой температуре этих тел. В этой же главе Клапейрон предлагает способ графического представления тепловых процессов, осуществляющихся в газах, и в осях p - V изображает цикл, предложенный Карно (рис. 6). Представим себе одно тело, температура которого T поддерживается постоянной, пишет Клапейрон, и другое тело, температура которого t ниже, чем T . Например, первое тело - стенки котла, который получает теплоту за счет сгорания топлива, расходуемую на образование пара, и второе - представляющее собой конденсатор обычной паровой машины, где поток холодной воды отбирает теплоту, которой обладает полученный при данной температуре пар. Чтобы упростить дальнейшие рассуждения, обозначим первое тело A , второе - B .

Возьмем какой-либо газ, температура которого T , и приведем его в соприкосновение с телом A , имеющим ту же температуру. Состояние этого газа изобразим точкой, абсцисса которой OF соответствует объему исследуемого газа, а ордината - давлению. Если газ заключить в сосуд, объем которого может изменяться, и дать ему возможность расширяться в этом сосуде так, чтобы за счет излучения или теплопередачи теплота не расходовалась, то убыль теплорода при этом будет пополняться за счет тела A . Температура газа при расширении будет оставаться постоянной и равной T . Давление газа в этом случае будет изменяться в соответствии с законом Бойля-Мариотта. Графически этот процесс может быть представлен в виде кривой AB .

Предположим, что расширение газа будет продолжаться до тех пор, пока объем газа не станет равным OH . Новому значению объема будет соответствовать давление BH . В процессе расширения газ совершит работу, которая может быть вычислена как интеграл от произведения давления на изменение объема. Графически эта работа может быть представлена площадью фигуры, образованной осью абсцисс, ординатами OF и BH и отрезком гиперболы AB .

Удалим теперь тело A и, заключив газ в теплонепроницаемую оболочку, дадим ему возможность расширяться. Тогда часть теплорода перейдет в "скрытое" состояние, температура газа понизится и давление будет падать намного быстрее по неизвестному, как сообщает Клапейрон, закону, представленному графически линией BC . (Интересно то, что уравнение, описывающее адиабатный процесс, было выведено французским физиком Пуассоном еще до того, как была издана работа Карно.)

Продолжим расширение газа до тех пор, пока за счет перехода теплорода в скрытое состояние температура газа не изменится от T , соответствующей температуре тела A , до температуры t , равной температуре тела B . При этом объем газа станет равным OK и соответствующее ему давление $СК$.

Из рисунка видно, что в течение второго этапа своего расширения газ совершает определенную работу, которая графически может быть представлена площадью неправильного четырехугольника $ВСКН$.

Теперь, когда газ достиг температуры t , равной температуре тела В, приведем его в контакт с этим телом. Исключая теплопроводность и излучение в окружающее пространство, будем сжимать исследуемый газ. Вследствие сжатия температура газа начнет повышаться, станет заметнее стремление теплорода перейти к телу В в таком количестве, чтобы температура газа продолжала оставаться равной t . В соответствии с законом Бойля-Мариотта давление газа будет возрастать. Графически это будет соответствовать ординатам гиперболы CD; абсцисса при этом будет обозначать объем газа.

Продолжим сжатие до тех пор, пока не добьемся того, что телу В будет передана теплота, в точности равная той, которая была сообщена газу телом А во время контакта с ним в первой фазе процесса расширения. Объем газа при этом станет равным OG и соответствующее ему давление GD. В этом состоянии газ обладает точно таким же количеством теплорода, как и в начале процесса, когда его объем был равен OF и давление AF. Если теперь тело В отнять и удалить, а сжимаемый газ заключить в теплонепроницаемую оболочку, то благодаря увеличению давления объем газа уменьшится от OG до OF, скрытый теплород при этом освобождается и температура газа будет постепенно повышаться. Давление в этом случае увеличивается и достигает значения, соответствующего ординате AF, если объем газа уменьшится до OF. Температура газа при этом достигнет начального значения, равного T.

Далее Клапейрон ставит задачу вычисления работы, совершаемой газом в этом цикле. Ход его рассуждений предельно прост. Уменьшение объема от ОК до OF требует совершения внешними силами работы, значение которой может быть представлено неправильными четырехугольниками DC KG и ADGF. Вычитая площади фигур ABCKFA и ADCKFA, которые представляют числовые значения работы расширения и сжатия, найдем их разность, равную площади, ограниченной фигурой ABCD. Числовое значение площади этой фигуры в осях p - V равно работе, совершаемой газом за описанный цикл. При расчетах подразумевается, замечает Клапейрон, что конечное состояние в точности совпадает с начальным. Расход теплорода при этом отсутствует: та теплота, которую газ отбирает от тела А при расширении, передается телу В при сжатии во время контакта этих тел с рабочим телом.

Клапейрон приходит к выводу, что "механическая энергия развивается благодаря переходу теплорода от теплого тела к холодному; этот переход совершается без того, чтобы где-нибудь имелся контакт между телами, имеющими разные температуры".

Заканчивая описание прямого цикла, Клапейрон рассматривает обратный, в результате которого развивается теплота за счет работы внешних сил. Здесь он отмечает, что если внешними силами произвести работу над газом, равную совершенной им в прямом процессе, то при этом произойдет перенос теплоты от тела В к телу А в таком же количестве, как перенесено в прямом процессе от тела А к телу В.

Продолжая изложение, Клапейрон распространяет свои выводы на двухфазную систему - жидкость и ее пар. Для этого случая цикл также может быть представлен графически (рис. 7). Участок с постоянным давлением соответствует фазовому переходу пар - жидкость при постоянной температуре. Указывая на возможность обратного цикла для двухфазной системы, Клапейрон приходит к выводу: "Количество работы, совершаемое газом, и количество теплоты, перешедшее от теплого тела к холодному, - величины одинакового типа, которые могут переходить друг в друга, взаимопревращаться. Здесь дело обстоит так же, как и в механике, где тело, которое может падать с определенной высоты, и тело, обладающее определенной скоростью, характеризуются величинами одного вида, которые могут благодаря определенным устройствам превращаться друг в друга".

Этот вывод он повторил вслед за Карно, дневниковые записи которого оставались еще неизвестными. Из приведенного отрывка ясно, что Клапейрон, вплотную подойдя к закону сохранения и превращения энергии, не сумел далее развить свои рассуждения, не смог обобщить их и сформулировать этот важнейший закон естествознания. Пройдет еще около 10 лет, прежде чем этот закон будет окончательно установлен и утвержден в физике Р. Майером, Дж. Джоулем, Г. Гельмгольцем и другими исследователями.

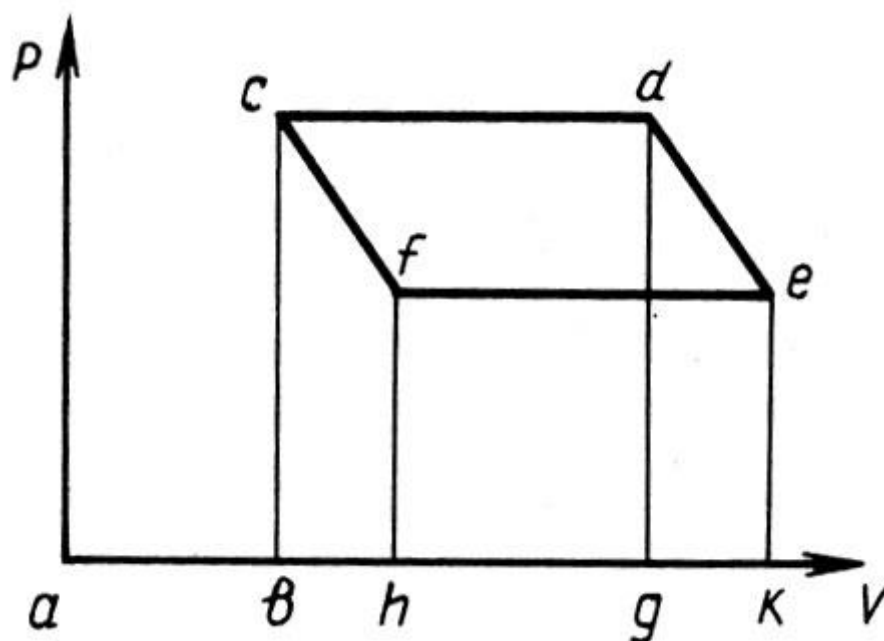


Рис. 7. Клапейрон распространяет свои выводы на двухфазную систему - жидкость и ее пар

В третьей главе Клапейрон приступает к математическим расчетам. В первую очередь он дает запись объединенного газового закона, который называет "уравнением состояния Гей-Люссака-Мариотта". В записи Клапейрона этот закон имеет вид:

$$pV = R(267 + t)^1,$$

Объединенный газовый закон (1)

где

$$R = \frac{p_0 V_0}{267 + t}.$$

Расчёт R

Несмотря на то что уравнение (1) встречается и в работе Карно, оно справедливо названо уравнением Клапейрона. Именно Клапейрон при расчете различных процессов, осуществляющихся в газах, первым использовал его для тепловых расчетов, четко определив область его применения.

(В настоящее время более точные измерения дают для коэффициента объемного расширения газов не $1/267$, а $1/273$)

В дальнейшем для удобства математических расчетов Клапейрон принимает температуру горячего тела равной t ; температура холодного тела при этом отличается на бесконечно малую величину Δt и равна $t - \Delta t$ и предполагает бесконечно малые изменения параметров газа при совершении им элементарного цикла, составленного из двух изотермических и двух адиабатных процессов. В этом случае с достаточной точностью отрезки изотерм можно считать отрезками прямых; аналогично можно рассматривать и отрезки адиабат, замыкающих изотермы для температур t и $t - \Delta t$. Работа, совершаемая газом в течение цикла, графически представленная в осях "давление - объем", численно равна площади фигуры ABCD, которая представляет собой параллелограмм. Следовательно, работа, выполненная за описываемый цикл, может быть вычислена как произведение приращения давления (Δp) на приращение объема. Производя эти расчеты, Клапейрон получает выражение для работы, совершаемой газом при нагревании его на Δt :

$$\Delta A = \frac{R \Delta V \Delta t}{V}.$$

Выражение для работы

Теплота, переданная при этом газу, является функцией температуры, которая в свою очередь, как это следует из уравнения состояния, сама есть функция объема и давления. Путем математических операций Клапейрону удалось найти также выражение для теплоты (ΔQ) и записать выражение интересующего его отношения $\Delta A / \Delta Q$.

Данное выражение, пишет Клапейрон, представляет собой наибольшее значение работы, которая может быть совершена газом при переходе единицы теплоты от тела с температурой t к телу с температурой $t - \Delta t$. Эта работа не зависит от рода вещества, которое используется при переносе теплоты, одинакова для всех газов и не зависит от количества вещества, участвующего в этом цикле. Однако ничего нельзя сказать, что это отношение не зависит от температуры. Вполне вероятно предположить, что отношение $\Delta A / \Delta Q$ представляет собой неизвестную функцию температуры ($C = f(t)$),

одинаковую для всех газов и имеющую важное значение в теории тепловых машин.

Дальнейшие математические расчеты, выполненные Клапейроном, приводят к выражению

$$\frac{\Delta A}{\Delta Q} = \frac{\Delta t}{C},$$

Функция Карно (2)

в котором встречается эта функция, названная позднее функцией Карно (C). Клапейрон справедливо утверждает, что функция Карно имеет большое значение в теории газов, и в последующих главах предпринимает многократные попытки рассчитать ее в широком диапазоне температур. Однако полученные результаты не удовлетворяли его. В этой же главе ученый приводит полученную им формулу

$$Q - Q' = RC \ln p'/p = RC \ln V/V',$$

Изменение объема газа (3)

из которой следует, что при изменении объема газа или его давления при постоянной температуре в одинаковое число раз газ отдает или принимает одно и то же количество теплоты, что совпадает с результатом, установленным Дюлонгом экспериментально.

Далее, используя эту формулу, Клапейрон математически поясняет, почему газ, расширяясь в пустоту, не нагревается и не охлаждается. По Клапейрону, понижение давления от p' до p или увеличение объема от V до V' при постоянной температуре вызовет изменение количества теплоты, содержащееся в рабочем теле:

$$Q - Q' = \frac{pV}{267 + t} C \ln \frac{V}{V'} = \frac{pV}{267 + t} C \ln \frac{p'}{p}.$$

Количество температуры (4)

Числовое значение $\ln p'/p$ очень большое, но произведение $p \ln p'/p$ будет очень малым, если газ расширяется в разреженное пространство, так как $p \rightarrow 0$. Для этого случая Клапейрон находит выражение

$$p \ln p'/p = p (\ln p' - \ln p),$$

Теплота

т. е. теплота, развиваемая газом при его расширении в некоторый сосуд, будет тем меньше, чем ниже давление в этом сосуде, и она равна нулю, если расширение происходит в вакуум.

Все установленное Клапейроном справедливо только для идеальных газов. В действительности реальные газы, расширяясь в пустоту, нагреваются или охлаждаются. Это явление, известное как *эффект Джоуля - Томсона*, можно математически рассчитать, если уравнение Клапейрона, справедливое для идеальных газов, заменить уравнением состояния для реальных газов.

Возвращаясь к математическим расчетам отношения работы к теплоте, стоит обратить внимание на то, что это отношение по своей физической сути есть не что иное, как выражение для коэффициента полезного действия тепловой машины. Если разность температур нагревателя и холодильника записать в виде

то, сравнивая его с современным выражением

$$\Delta t = \Delta T = T_1 - T_2,$$

Температура

нетрудно заметить, что функция S представляет собой абсолютную температуру нагревателя.

$$\frac{\Delta A}{\Delta Q} = \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

КПД (5)

В третьей главе Клапейрон теоретически доказывает, что разность между теплоемкостью при постоянном давлении и теплоемкостью при постоянном объеме одинакова для всех газов. Следует заметить, что все эти рассуждения автора проведены с использованием гипотезы теплорода.

Наиболее оригинальны рассуждения Клапейрона, проведенные им в четвертой главе. Здесь автор переносит способ расчета газов на пар, точнее, на систему "жидкость - пар" и находит вид уравнения фазового перехода.

Рассмотрим двухфазную систему "жидкость - пар" при температуре t . Начальное давление в сосуде равно bc (см. рис. 7). Приведем эту систему в контакт с телом A , температура которого также равна t . Вследствие перехода теплоты от тела к системе произойдет увеличение объема последней. Это увеличение объема cd , сопровождающееся парообразованием, будет происходить при постоянном давлении и температуре. Затем уберем тело A и, заключив систему в теплонепроницаемую оболочку, предоставим ей возможность адиабатно расширяться до объема ak . Температура при этом снизится на бесконечно малую величину Gt и примет значение $t - \Delta t$, равное температуре тела B . После этого сосуд, содержащий жидкость и ее пар, приведем в контакт с телом B и будем уменьшать объем от ak до ah . Развиваемая при этом теплота будет переходить от системы к телу B . Температура и давление в этом процессе будут сохранять неизменными свои значения.

После того как объем системы уменьшится до ah , уберем тело B , снова заключим систему в теплонепроницаемую оболочку и далее будем адиабатно уменьшать объем до значения ab . Температура газа при этом повысится на Δt и станет равной t , что соответствует ее первоначальному значению. При этом объем, занимаемый системой, примет то же значение, что и в начале цикла. Давление достигнет первоначального значения, равного bc . На этом и заканчивается полный цикл, совершаемый двухфазной системой.

Известно, что работа, развиваемая рабочим телом при переносе им теплоты от нагревателя к холодильнику, численно равна площади четырехугольника, образованного процессами, графически изображенными в осях "объем -

давление". Пренебрегая бесконечно малыми второго порядка, найдем эту площадь как произведение объема cd на изменение давления $dg-ek$. Так как давление есть функция температуры, можем записать, используя правила дифференциального исчисления:

$$dg - ek = \left(\frac{dp}{dt} \right) dt.$$

Используя правила дифференциального исчисления (6)

Отрезок cd представляет собой увеличение объема вследствие перехода жидкости в пар под давлением p при неизменной температуре.

Если обозначить Q - плотность жидкости, а δ - плотность пара этой жидкости и V - объем образовавшегося пара, то произведение δV представляет собой массу образовавшегося пара, а $\delta V / \varrho$ - объем испарившейся жидкости.

Изменение объема системы, вызванное испарением жидкости, может быть представлено выражением

$$dV = V - \frac{\delta V}{\varrho} = V \left(1 - \frac{\delta}{\varrho} \right).$$

Изменение объема системы, вызванное испарением жидкости (7)

Тогда совершаемая при этом работа может быть определена как произведение

$$\left(1 - \frac{\delta}{\varrho} \right) V \frac{dp}{dt} dt.$$

Работа (8)

Теплота, за счет перехода которой совершается работа, есть не что иное, как скрытый теплород единицы объема образовавшегося пара, или, по современной терминологии, удельная теплота испарения. Количество скрытого теплорода в единице объема этого пара (удельную теплоту испарения)

обозначим k . Тогда удельную теплоту испарения пара, объем которого V , можно определить как произведение $k V$. Отношение совершенной работы к используемому для этого количеству теплоты может быть представлено выражением

$$\frac{\left(1 - \frac{\delta}{q}\right) \frac{dp}{dt} dt}{k}.$$

Отношение совершенной работы (9)

Эта работа, как ранее показал Клапейрон, является наибольшей, которая может быть получена с использованием единицы теплоты, и не зависит от природы рабочего тела, одинакова для газов и паров. Это же выражение с учетом (2) может быть переписано в виде

$$\frac{\left(1 - \frac{\delta}{q}\right) \frac{dp}{dt}}{k} = \frac{1}{C}.$$

Отношение совершенной работы с учетом (2)(10)

Отсюда следует, что удельная теплота испарения данного газа может быть определена по формуле

$$k = \left(1 - \frac{\delta}{q}\right) \frac{dp}{dt} C.$$

Удельная теплота (11)

Для большинства паров отношение δ/q очень близко к нулю в области температур, далеких от кипения. Поэтому с большой точностью для этого случая выражение (11) можно переписать в виде

$$k = C \frac{dp}{dt},$$

(11) с большей точностью (12)

из которого следует, что удельная теплота испарения одинаковых объемов паров некоторых жидкостей при одинаковой температуре и соответствующем давлении пропорциональна производной от давления по температуре.

Уравнение Клапейрона, обобщенное впоследствии Клаузиусом, представляет собой термодинамическое уравнение, относящееся к процессам перехода вещества из одной фазы в другую (испарение, плавление, сублимация и др.). В современной записи уравнение Клапейрона-Клаузиуса имеет вид:

$$L = T \frac{dp}{dT} (V_2 - V_1),$$

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса (13)

где L - теплота фазового перехода; T - температура фазового перехода (процесс фазового перехода изотермический); $V_2 - V_1$ - изменение объема вещества при переходе его из первой фазы во вторую.

Уравнение, полученное Клапейроном, устанавливает связь между изменением давления и изменением температуры по кривой фазового перехода первого рода для чистого вещества. Важность полученного уравнения заключается в том, что, используя его, можно рассчитать наиболее трудно определяемые опытным путем величины, характеризующие состояние вещества при фазовом переходе.

Получив уравнение фазового перехода, Клапейрон рассматривает результаты, вытекающие из него, для некоторых частных случаев. Так, он пишет, что если C и dp/dt имеет конечные значения, то при $Q=b$, k стремится к нулю, т.е. если давление велико и температура достаточно высокая, то плотность пара может быть равна плотности жидкости и, как это следует из последней формулы, удельная теплота испарения в этом случае должна быть равна нулю. Далее, удельная теплота испарения жидкости, имеющей высокую температуру кипения, например ртути, должна быть очень малой, так как для паров ртути dp/dt очень мало. Эти выводы Клапейрона, как показали последующие эксперименты, вполне соответствуют действительности.

Развивая далее свои исследования, в пятой главе ученый утверждает, что вся информация, полученная им для газов и паров, справедлива и для жидкостей. Для жидкостей давление, температура, объем и количество теплорода, содержащегося в них, связаны так же, как и у газов. Математические преобразования, выполненные им, настолько громоздки и сложны, что автор, чувствуя это, вынес их в "Дополнения", помещенные в конце работы.

Одним из результатов, полученных Клапейроном, является формула для нахождения количества теплоты, развиваемой газом при изменении его состояния:

$$dQ = dpC\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p,$$

Количества теплоты (14)

где dp - изменение давления; C имеет одинаковое значение как для газов, так и для жидких и твердых тел.

Из полученной формулы следует, что для тела в любом агрегатном состоянии увеличение давления при постоянной температуре приводит к возникновению теплоты, значение

которой пропорционально изменению объема этого тела. "Это утверждение, - пишет Клапейрон, - есть общий вывод, который можно получить из основного принципа: совершенно бессмысленно полагать, что движущая сила или теплота может быть получена из ничего и безвозмездно".

В шестой главе Клапейрон вновь и вновь излагает способы, позволяющие определить вид функции C . Прямые способы решения этой задачи, к сожалению, пишет ученый, отсутствуют. Однако, имея экспериментальные данные и предлагаемый им математический аппарат, можно хотя бы приближенно найти ее значение для некоторых температур и попытаться определить характер ее изменения с температурой.

Ссылаясь на работы Дюлонга, Клапейрон утверждает, что при сжатии воздуха или другого газа, взятого при температуре $t=0^{\circ}\text{C}$ и при нормальном атмосферном давлении на $1/267$ часть его объема, образуется теплота, которой достаточно, чтобы

нагреть этот воздух на 0,421 °С. Если взять воздух массой 1 кг при нормальном давлении, объем которого равен 0,770 м³, то, используя ранее полученные уравнения, можно вычислить значение этой функции. Далее Клапейрон ставит задачу выяснить, как изменяется значение этой функции с температурой. Эти вычисления он проводит с использованием экспериментальных данных Лароша и Берара. Из их опытов следует, что в диапазоне 96,90 - 22,83°C функция С хотя и медленно, но все-таки растет.

Применяя полученное им ранее уравнение фазового перехода, он предпринимает попытку найти значение С для других температур, в частности лежащих вблизи точки кипения той или иной жидкости. Пренебрегая плотностью пара в сравнении с плотностью жидкости в полученном ранее уравнении и считая значение $\frac{dp}{dt}$ вблизи точки кипения примерно одинаковым для всех веществ, он находит:

$$\frac{1}{C} = \frac{dp}{dt} \frac{1}{k}.$$

С для других температур (15)

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что функция С тоже примерно одинакова для всех веществ, так как значение k (количество теплорода, содержащееся в равных объемах газа) - величина постоянная. Кроме того, Клапейрон использует данные экспериментов Араго и Дюлонга, поставленных для исследования скорости звука в различных газах в температурном диапазоне 100 - 224°C для установления вида и числового значения этой же функции.

Сравнивая данные, полученные различными способами, можно заключить, что ученый нашел правильный способ вычисления этого значения, но дальше на этом пути продвинуться ему не удалось. Выяснить вид функции, которая входила в выражение для коэффициента полезного действия тепловой машины, удалось позже другим ученым.

В седьмой главе Клапейрон вновь обращает внимание читателей на значение этой загадочной функции. "Эта функция, - пишет он, - может быть использована для расчета многих тепловых явлений, как тех, которые хотя и

недостаточно, но все-таки исследованы, так и тех, которые пока еще не известны".

В последней, восьмой главе Клапейрон высказывает ряд соображений, касающихся непосредственно паровых машин. Здесь же он высказывает предположение, что у машин, холодильник которых находится при температуре 100°C , теплород используется не полностью, а только часть его при переходе от температуры котла к температуре 100°C ; переход от 100°C до температуры окружающей среды означает потерю энергии. Наиболее выгодны те машины, утверждает он, у которых температура отработанного пара ближе к температуре окружающей среды, в которую выбрасывается пар. Для этого необходимо так проводить расширение, чтобы температура пара была равна температуре конденсатора. Все практические попытки повышения движущей силы за счет теплоты, продолжает Клапейрон, должны предусматривать именно это. Главное, отмечает ученый, не температура, а разность температур между нагревателем и холодильником. Такие же факторы, как природа рабочего тела, его агрегатное состояние, не оказывают никакого влияния на эффективность работы тепловых машин.

Значение работ Клапейрона для становления и развития термодинамики

После краткого ознакомления с содержанием работы Клапейрона "Размышления о движущей силе огня" можно просуммировать все то, что сделано французским ученым в области термодинамики.

Клапейрон сделал работы Карно доступными для понимания, что способствовало дальнейшему развитию основанного им учения о тепловых машинах. Пониманию идей, высказанных Карно, во многом способствовал графический метод, разработанный и впервые использованный в этой области знаний Клапейроном. В настоящее время графическое изображение тепловых процессов настолько широко распространено и общепринято, что трудно представить учение о тепловых машинах и о тепловых процессах вообще в эпоху, предшествующую написанию работы Клапейроном. Развивая идеи Карно, он получил ряд оригинальных результатов. Наибольшую известность Клапейрону принесло установление вида уравнения состояния идеального газа в

форме $p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2 = \text{const}$, которое во всех учебниках и справочных пособиях справедливо называют его именем.

Уравнение состояния в форме $pV = \frac{m}{M}RT$ (как записано в учебнике средней школы) было впервые получено великим русским ученым Д. И. Менделеевым. Поэтому его называют *уравнением Менделеева - Клапейрона*. Именно Клапейрон первым понял значение этого уравнения для описания свойств газов и первым начал пользоваться этим уравнением для расчета тепловых процессов. И если бы Клапейрон не сделал ничего больше в науке, то и этого было бы достаточно, чтобы его имя навечно осталось в истории физики. Но это уравнение далеко не единственный научный результат, снискавший славу французскому ученому.

Представляя протекающие в газах процессы графически, Клапейрон не только обеспечил наглядность изучения их, но и сделал возможным широкое применение математических методов для расчета различных процессов и вычисления параметров, характеризующих состояние газа. Вычислив работу, производимую газом, и теплоту, затраченную при этом, он нашел отношение этих величин; продолжил исследования Карно по вопросу КПД тепловых машин. Получив отношение работы к теплоте, Клапейрон тем самым одним из первых среди ученых поднял вопрос о значении механического эквивалента теплоты и предпринял первые попытки к его определению.

Распространяя выводы, полученные для идеального газа на двухфазную систему "жидкость - пар", он получил *уравнение фазового перехода*, одно из важнейших уравнений термодинамики, широко использующееся для расчета тепловых констант.

Даже краткое перечисление оригинальных результатов, полученных Клапейроном, не оставляет сомнения в том, что заслуги этого ученого в термодинамике основательны. Именно работа Клапейрона стимулировала дальнейшие исследования ученых в области тепловых явлений и способствовала возведению стройного здания термодинамики.

Глава IV Клаузиус и становление термодинамики

От Клапейрона до Клаузиуса

В XIX в. темпы развития науки заметно возросли. Каждое десятилетие этого века давало столько нового, сколько столетия в предшествующие эпохи. Причинами необычного взлета науки были нужды развивающейся промышленности и всеобщий прогресс. Физика как наиболее близкая к практике отрасль знания ощутимо набирала темпы. За шестнадцатилетний период, прошедший между появлением работ Клапейрона (1834) и Клаузиуса (1860), в физике произошли важные события. Так, в 1839 г. немецким ученым К. Гауссом была создана теория потенциала. В 1845 г. английский физик М. Фарадей открыл диамагнетизм и парамагнетизм; им же открыто явление вращения плоскости поляризации в магнитном поле, что подтверждало давно предсказываемую связь света и магнетизма. В эти же годы открыт эффект Доплера, законы Кирхгофа и Джоуля-Ленца, произведено первое лабораторное измерение скорости света.

Не отставали в развитии и те разделы физики, которые были связаны с тепловыми явлениями. Наиболее выдающееся событие в этой области произошло в 1842 г. В этом году немецкий врач-физиолог Р. Майер (1814 - 1878) опубликовал работу, в которой был сформулирован открытый им закон сохранения и превращения энергии. В 1843 г. Дж. Джоуль (1818 - 1889) доказал этот закон и, наконец, в 1847 г. соотечественник Майера Г. Гельмгольц (1821 - 1894) теоретически решил этот вопрос в более общем виде.

В 1843 г. Джоуль, изучая вопросы взаимопревращения теплоты и работы, первым из исследователей экспериментально измерил работу, которую необходимо произвести, чтобы определить единицу теплоты. Эти исследования Джоуля, естественно, способствовали утверждению идеи, высказанной Майером.

Результаты экспериментальных исследований этих лет помогли ученым окончательно порвать со старыми заблуждениями относительно природы теплоты. Однако с общим развитием науки количество вопросов, поставленных перед природой, не убывало. Одновременно с решением старых вопросов в науке возникали новые. Практика настойчиво требовала от науки более эффективных результатов. Тепловые явления оказались в эти годы в центре

внимания практиков. Важно было не только понять и установить закономерности протекания того или иного теплового процесса: ученых интересовали более общие сведения о возможности их практического осуществления. В этом направлении было много неизвестного. В первую очередь предстояло выяснить, в каком направлении протекают различные процессы в природе, какие из них практически осуществимы, как оценить эффективность работы той или иной тепловой машины. Решение этих вопросов вскоре было найдено, да иначе и быть не могло, так как в рядах ученых, работавших в этом направлении, были такие именитые физики, как У. Томсон, Р. Клаузиус, Дж. Джоуль и много других, не менее талантливых исследователей.

В 1849 г. после детального ознакомления с исследованиями Карно (по работе Клапейрона) У. Томсон (лорд Кельвин) опубликовал в "Трудах Лондонского Королевского общества" статью под названием "Доклад о теории Карно - о движущей силе теплоты с численными результатами, полученными из опытов Реньо над парами". Как следует из названия, статья была посвящена дальнейшему развитию идей французского инженера. В этой работе Томсон четко выделил все то ценное, что содержалось в сочинении его предшественника по поводу работы тепловой машины. Особо подчеркивал он основную мысль Карно о том, что необходимым условием превращения теплоты в работу является наличие двух тепловых резервуаров с различной температурой. Относительно природы теплоты в этой работе Томсон не высказался сколько-нибудь конкретно, хотя чувствовал справедливость выводов, следующих из экспериментов Джоуля, противоречащих вещественной теории теплоты.

Еще раньше, в 1848 г., Томсон поставил вопрос о необходимости разработки принципа измерения температуры, результаты которого не зависели бы от природы термометрического тела. Он не только сформулировал проблему, но и сделал первые шаги к ее разрешению. Для измерения температур он предложил шкалу, единицей которой являлся температурный интервал, соответствующий совершению определенной механической работы. "Основным свойством шкалы, которую я теперь предлагаю, - пишет он, - является то, что все ее градусы имеют одно и то же значение, то есть что единица теплоты, падающая от тела Л с температурой T° по этой шкале к телу В с температурой $(T^{\circ}-1)$,

будет давать один и тот же механический эффект, каково бы ни было число T . Такая шкала действительно может быть названа абсолютной, так как для нее характерна полная независимость от физических свойств какого-либо вещества".

Дальнейшие исследования этого вопроса привели Томсона к идее измерения абсолютной температуры с использованием идеальной машины Карно, эффективность работы которой как раз не зависела от природы рабочего тела. Для машины Карно справедливо равенство

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2},$$

Для машины Карно

в котором Q_1 - теплота, переданная рабочему телу от нагревателя, температура которого T_1 ; Q_2 - теплота, принятая холодильником, температура которого T_2 .

Фиксируя одну из температур, например T_2 , используя в качестве холодильника смесь воды со льдом, калориметрически измеряя Q_1 и Q_2 , нетрудно вычислить температуру нагревателя, роль которого может выполнять исследуемое тело и температуру которого необходимо определить, по формуле

$$T_1 = T_2 \frac{Q_1}{Q_2}.$$

Температуру

Идеи Томсона, касающиеся термометрии, были им подробно разработаны и развиты в последующих публикациях.

В 1850 г. в Англии выходит из печати еще одна работа, представляющая интерес для ученых, занимающихся исследованием тепловых явлений. Автором этой работы был выпускник Эдинбургского университета У. Ранкин (1820 - 1872). В своей работе он высказывает мысль, что при действии тепловой машины в холодильник отводится только часть теплоты, полученная от нагревателя, а не вся, как это представлял себе Карно, а вслед за ним Клапейрон и Томсон.

Другая же часть, утверждал Ранкин, пропорциональная произведенной работе, исчезает из системы. Это замечание, важность которого будет подтверждена в последующих работах физиков, было высказано в том же году, в котором была опубликована первая работа Клаузиуса, посвященная вопросам теплоты. Однако для справедливости следует отметить, что Ранкин пришел к этой мысли самостоятельно и не был знаком с работой немецкого коллеги.

В 1851 г. Томсон публикует очередную работу, посвященную исследованию тепловых явлений, которая называлась "О динамической теории теплоты с численными выводами, полученными на основе джоулева эквивалента тепловой единицы и наблюдений Реньо над водяными парами". С первых же фраз этой работы чувствуется, что опыты Джоуля окончательно убедили Томсона в том, что теплота не есть "особая упругая жидкость", а представляет собой "особого рода движение, возбуждаемое в частицах тела". Далее ученый делает вывод, что если теплота представляет собой динамическую форму механического эффекта, то должна существовать некоторая эквивалентность между механической работой и теплотой.

В этой же работе он подробно анализирует действие тепловой машины и указывает, что все изменения, происходящие в машинах, должны быть строго периодическими. Серию движений, произведенных в подобной машине за период, к концу которого тела возвращаются в точности к тому состоянию, в каком они находились в начале периода, Томсон предлагает назвать *полным циклом*.

Далее, развивая идеи Карно, он приходит к важному выводу, который был позже переформулирован Клаузиусом в виде основного закона термодинамики - ее второго начала. Хотя Томсон и пришел ко второму началу раньше Клаузиуса, он не смог понять всеобщности и универсальности полученных им результатов. Коллеги не поддержали его: одни считали его выводы неверными, другие - настолько самоочевидными, что не видели необходимости выделять их в особый закон. Предстояла еще упорная борьба за утверждение второго начала термодинамики в физике. Заключая перечисление заслуг Томсона в развитии термодинамики, приведем несколько цитат, в которых наиболее отчетливо

прослеживается эволюция принципа Карно в публикациях Томсона.

Обсуждая достижения Карно, Томсон пишет: "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 ровно столько механической работы, сколько могла бы произвести за счет заданного количества тепла любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника". Доказательство этого положения Томсон предлагает провести на основании сформулированной им аксиомы: "Невозможно при помощи неодушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическую работу путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих тел". Аксиоматичность этого утверждения Томсон аргументирует тем, что невыполнение его означало бы возможность получать при помощи тепловой машины механическую работу в неограниченном количестве путем охлаждения суши и моря и в конце концов всего материального мира.

Здесь стоит прервать исторический экскурс в теорию тепловых явлений. В эти годы исследованием интересующего нас вопроса занимался немецкий ученый Клаузиус, который и довел его до завершающего этапа.

Построению термодинамики Клаузиусом способствовали теоретические и экспериментальные результаты, полученные его предшественниками. Без работы Карно, без ее интерпретации Клапейроном, без исследований свойств газов и паров и открытия закона сохранения и превращения энергии невозможно было бы осуществить те фундаментальные исследования, которые составляют сегодня сущность классической термодинамики. Если Карно высказал основную идею, Клапейрон и Томсон более обстоятельно разработали ее, то Клаузиус окончательно завершил трудные поиски по установлению второго начала термодинамики.

Биографические сведения

Рудольф Клаузиус родился 2 января 1822 г. в городе Кеслине, в семье пастора. Начальное образование получил в

небольшой частной школе, которую патронировал его отец. После завершения начального образования он поступает в гимназию города Штеттина, окончив которую будущий ученый был принят в Берлинский университет. Интересы восемнадцатилетнего юноши были весьма разносторонни: его одинаково привлекали и история, лекции по которой читал известный в те годы профессор Л. Ранке, и математика, и физика. Но со временем гуманитарные дисциплины уступили место точным наукам. Университет был закончен блестяще. Для продолжения образования Клаузиус был командирован в университет города Галле для стажировки и написания диссертации, защита которой была завершающим этапом университетского образования. Здесь, в Галле в течение двух лет Клаузиус провел свои первые научные исследования в лабораториях университета, за что ему в 1847 г. была присуждена степень доктора философии.



Р. Клаузиус

Тематика первых научных исследований Клаузиуса заслуживает внимания, так как именно эти годы становления его как ученого и выбор тематики научных поисков во многом определили карьеру будущего исследователя. В первой статье, опубликованной в 1847 г., он описывает результаты своих исследований по проблеме отражения света. Эта, казалось бы, малоперспективная проблема увлекла молодого ученого, подошедшего к ее разрешению с совершенно неожиданной стороны. Уже в этой статье можно было заметить хватку настоящего исследователя: глубокий анализ явления,

широкие познания в физике, безупречное владение математическим аппаратом. Для более глубокого проникновения в сущность изучаемого им явления Клаузиус разработал микроскопическую модель этого явления, с помощью которой ему удалось математически исследовать интересующие его вопросы. В этой работе он утверждает, что голубой цвет неба обусловлен отражением волн голубой части спектра от тонких пленок воды, которые содержатся в атмосфере в виде микропузырьков. Здесь же им был дан математический расчет условий возникновения и существования этих пузырьков, их концентрации и размеров, толщины образуемой ими пленки, а также проведены другие, не менее важные математические выкладки.

В следующей работе, появившейся в печати в этом же году, Клаузиус показал, что при исследовании механических свойств упругих тел наблюдаются аномалии в их свойствах. Для объяснения этих аномалий он высказывает мысль, что молекулы, образующие упругое тело, по своему строению несколько отличны "от нормальных", или, точнее, за аномалии механических свойств упругих тел ответственны искажения в строении молекул. (Для себя отметим тот факт, что в этих рассуждениях Клаузиус зрительно представлял себе молекулы, хотя соответствующих теорий еще не существовало; он "видел" дефекты в их строении и искажения.)

Это глубокое проникновение в сущность изучаемого объекта позволило разработать ему в последующие годы основы молекулярно-кинетической теории и способствовало его плодотворным научным поискам. Именно эти первые работы явились подготовкой для начинающего ученого к разрешению более серьезных, фундаментальных задач современной ему физики.

Признание научных заслуг Клаузиуса пришло после выхода из печати его работы "О движущей силе тепла и о законах, которые могут быть получены из учения о теплоте", опубликованной в 1850 г., всего через три года после получения им степени доктора философии. Содержание, этой работы явилось продолжением научных поисков Карно и Клапейрона. В этой работе Клаузиус обсуждает важные для того времени вопросы взаимопревращения теплоты и работы. Здесь же ученый дает обобщение уравнения Клапейрона -

уравнения фазового перехода, которое он распространил на жидкость и на твердые тела (уравнение Клапейрона - Клаузиуса). В этой же работе, используя более точные табличные данные, он продолжает поиски вида функции Карно и ищет новые способы вычисления механического эквивалента теплоты. Нельзя не отметить тот факт, что уже в начале этой статьи Клаузиус в отличие от предшественников отрицает сохранение теплоты при работе тепловой машины. Он утверждает, что теплота не перераспределяется между нагревателем и холодильником, а исчезает в количестве, пропорциональном произведенной работе.

Эта статья Клаузиуса получила благоприятные отзывы в среде коллег и была замечена ведущими европейскими учеными. Официальным признанием научных заслуг Клаузиуса явилось назначение его в 1850 г. на должность преподавателя Королевской артиллерийской технической школы в Берлине. Клаузиус с увлечением продолжает развивать исследования по избранной им теме - учению о тепловых процессах. Его публикации все больше привлекают внимание ученых.

Через пять лет после выхода из печати работы, посвященной исследованию тепловых процессов, Клаузиуса приглашают в Цюрихский политехникум на должность профессора математической физики. Приглашение было принято, и вскоре молодой ученый, имя которого уже получило известность в европейских научных центрах, приступает к исполнению своих служебных обязанностей.

Годы работы в Цюрихе были самыми плодотворными в научном творчестве Клаузиуса. Здесь произошло его становление как ученого и именно здесь он создал свои работы, которые принесли ему мировую известность. В эти годы Клаузиус занимался вопросами теплоты и созданием молекулярно-кинетической теории. Сообщения о результатах его научных исканий выходили из печати регулярно, причем каждая последующая работа развивала содержание предыдущих. Научная значимость его исследований была столь высока, что друзья и коллеги посоветовали ему объединить все опубликованные работы и подготовить монографию, в которой бы наиболее полно были изложены результаты его исследований. Обстоятельства благоприятствовали этому, и в 1867 г. она была опубликована

в трех томах под общим названием "Механическая теория тепла".

Первый том монографии содержал собственно учение о теплоте. Во втором томе рассматривались вопросы механической теории электричества, менее удачно разработанные ученым. В третьем томе были изложены основы кинетической теории газов. Этот фундаментальный труд ученого сразу же получил мировое признание коллег и был переведен на многие европейские языки. Нельзя сказать, что все было в изданной работе "чисто и гладко" и не нашлось ярых противников нового учения. Но споры по тем или иным вопросам, подготовка ответов оппонентам - устных и письменных - давали возможность ученому развивать и уточнять результаты, полученные им.

В 1867 г. сорокапятилетний ученый получает новое приглашение - занять профессию в университете города Вюрцбурга. Это было ближе к родным местам. Условия, которые ему предлагали, были заманчивы и казались более подходящими для продолжения научных изысканий. Все произошло так быстро, что Клаузиус впоследствии и сам себе не мог объяснить скоропалительность принятого им решения. В действительности все оказалось не так, как ожидал ученый. Перемена места жительства не благоприятствовала осуществлению его творческих замыслов: большая педагогическая нагрузка, взаимоотношения с коллегами, отличные от тех, что царили в политехникуме, отсутствие единомышленников. Клаузиус очень сожалел, что недостаточно продумал вопрос переезда. Но все это было поправимо. Проработав в Вюрцбурге два года, он без колебаний принимает новое приглашение и переезжает в Бонн. На этот раз его ожидания не были напрасными. Перемена места жительства оказалась удачной, о чем свидетельствует тот факт, что вся - остальная жизнь ученого связана именно с этим городом.

Однако боннский период жизни Клаузиуса нельзя назвать счастливым. Именно эти годы в жизни ученого были полны трагизма. В 1870 г. во время франко-прусской войны Клаузиус был тяжело ранен и долго лежал в полковом госпитале¹. Однако полностью излечиться ему не удалось: боли от раны мучили его все последующие годы и преждевременная смерть ученого, несомненно, связана с этим. Вскоре новый

трагический случай. В 1875 г. при рождении шестого ребенка умирает жена. Воспитание детей полностью легло на его плечи, и все последующие годы он посвятил не науке, а административной деятельности, домашним делам. Он мог сделать больше, но и того, что сделано им, достаточно, чтобы его имя навечно вошло в историю физики.

¹ (Обстоятельства ранения Клаузиуса установить по существующим источникам не удалось)

Исследования Клаузиуса до сих пор не утратили научной ценности. Именно им было сформулировано второе начало термодинамики в его окончательном виде, введено понятие энтропии, оказавшееся столь плодотворным при изучении тепловых явлений и процессов. Им же предсказана возможность сублимации, теоретически обоснован закон Джоуля-Ленца, разработаны теория термоэлектричества и теория поляризации диэлектриков. В физике известны уравнение Клапейрона-Клаузиуса, неравенство Клаузиуса, уравнение Клаузиуса - Моссоти, уравнение Клаузиуса - уравнение молекулярно-кинетической теории и многое другое. Как ведущий физик Европы он вместе с У. Томсоном, Г. Гельмгольцем, Г. Кирхгофом, А. Г. Столетовым и другими известными учеными был членом Специальной комиссии по разработке единой системы единиц физических величин, которая была создана Первым международным конгрессом электриков, проходившем в Париже в 1881 г.

В последние годы жизни Клаузиус занимал должность ректора Боннского университета. Он был членом многих научных обществ, в том числе иностранным членом Петербургской Академии наук (с 1878 г.), имел много наград и отличий как в своей стране, так и за ее пределами. Больше всего Клаузиус гордился золотой медалью Коплея, которой отметило его научные заслуги Лондонское Королевское общество в 1879 г. Умер Клаузиус в Бонне 24 августа 1888 г. в возрасте 66 лет.

Клаузиус и первое начало термодинамики

Как уже отмечалось, основные результаты, полученные Клаузиусом при исследовании вопросов теплоты, были изложены в его монографии. Для понимания и оценки сущности вклада Клаузиуса в развитие и становление

термодинамики достаточно ознакомиться с тремя первыми главами первого тома. Именно здесь заложен фундамент теоретической термодинамики, именно эта информация сохранила свое значение до наших дней.

Первую главу указанной работы предваряет математическое введение, в котором автором даны приемы механических и тепловых расчетов, математические определения основных физических величин, характеризующих процессы взаимопревращения теплоты и работы. Это можно понять даже по названиям параграфов "Введения": § 1. Понятие о механической работе и ее мера... § 3. Интегрирование дифференциала работы... § 8. Зависимость между работой и живой силой (кинетическая энергия. - В. К.) и т. д. Здесь же, в § 6 Клаузиус предлагает новый физический термин "эргал", эквивалентный термину "потенциальная энергия", введенному Ранкином. Но термин "эргал" коллеги не приняли и в науке он не прижился.

Первая глава монографии имеет название "Первое начало механической теории тепла, или принцип эквивалентности теплоты и работы". Прежде чем переходить к изложению результатов своих исследований, Клаузиус формулирует "исходный пункт теории". Начиная эту главу, он пишет: "В прежнее время было всеобщим воззрение, что теплота представляет собой особое вещество, которое в большем или меньшем количестве находится во всех телах, чем и обуславливается большая или меньшая высота их температуры; предполагалось, что все тела выделяют это вещество, которое затем с огромной скоростью пролетает через пустое пространство и даже через области, заполненные весомой массой, образуя, таким образом, лучистую теплоту. Однако в последнее время проложил себе путь взгляд, что теплота представляет некоторый род движения. При этом находящаяся в телах теплота, обуславливающая их температуру, рассматривается как некоторое движение весомых атомов, в котором может принимать участие также и находящийся в телах эфир. Лучистая теплота рассматривается как колебательное движение эфира". Далее он сообщает, что в последующем изложении он будет представлять теплоту как результат движения мельчайших частиц вещества, причем именно теплота должна быть мерой кинетической энергии этого движения. Это означает, что Клаузиус уже в те годы был в числе ученых, которые полностью отказались от

вещественной теории теплоты. Однако в отличие от многих коллег он не только отбрасывает старую теорию, но и предлагает новую, кинетическую теорию теплоты, которую и развивает в последующих работах. Именно в "Механической теории тепла" Клаузиус предложил для закона эквивалентности теплоты и работы название "первого начала механической теории тепла", которое впоследствии по предложению Томсона было названо "первым началом термодинамики". Здесь же он дает формулировку и математическое выражение этого закона, обобщив все известное по этому поводу в естествознании.

Первое начало термодинамики по своему содержанию представляет собой не что иное, как закон сохранения и превращения энергии для механических и тепловых процессов. Этот закон представляет собой результат многочисленных теоретических и экспериментальных исследований многих и многих ученых. Как уже указывалось, среди имен ученых, заложивших основы первого начала, следует отметить в первую очередь Р. Майера, Дж. Джоуля, Г. Гельмгольца, работы которых явились решающими для утверждения этого положения в науке. Первое начало термодинамики выясняет вопрос о процессе взаимопревращения теплоты и работы, рассматривая не только качественный, но и количественный аспекты этого процесса. Так, если термодинамической системе, например идеальному газу, сообщается некоторое количество теплоты, то наблюдается повышение температуры этого газа и как следствие его расширение. Процесс расширения газа можно использовать для получения работы против внешних сил, как это и осуществляется в тепловых машинах.

Повышение температуры рабочего тела ведет к увеличению его внутренней энергии, представляющей собой кинетическую энергию молекул, образующих газ, если рассматриваемый газ идеальный, и сумму кинетической и потенциальной энергий взаимодействия этих молекул, если исследуемый газ реальный. Из этих рассуждений становится понятным, что не вся теплота, сообщаемая системе, переходит в работу, а только часть ее, которая пропорциональна произведенной работе.

С учетом вышесказанного первое начало термодинамики можно сформулировать следующим образом: теплота,

сообщаемая системе (ΔQ), расходуется на увеличение внутренней энергии этой системы (ΔU) и на совершение работы этой системой против внешних сил (ΔA), или математически:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A.$$

Теплота (16)

Правда, Клаузиус пришел к этому выводу не сразу. Эволюцию его взглядов на физический смысл первого начала термодинамики можно проследить, знакомясь с соответствующим разделом его монографии. Рассуждая по этому поводу, он пишет: "Силы, которые участвуют в работе, можно разделить на два класса: во-первых, на те, с которыми атомы тела действуют друг на друга и которые поэтому коренятся в природе самого тела, и, во-вторых, на те, которые проистекают от посторонних воздействий, которые испытывает тело". В соответствии с этими рассуждениями Клаузиус подразделяет полную работу ΔA на два слагаемых:

$$\Delta A = \Delta I + \Delta W,$$

Полная работа

где ΔI - внутренняя, ΔW - внешняя работа, и записывает первое начало термодинамики в виде

$$\Delta Q = \Delta H + \Delta I + \Delta W,$$

Первое начало термодинамики

где ΔH - энергия хаотического движения молекул, составляющих изучаемую систему.

Далее он отмечает, что так как внутренние силы нам неизвестны, то есть смысл оперировать не с отдельными слагаемыми H и I , а с их суммой:

$$U + H + I,$$

Сумма

и дает название образованной таким образом функции V внутренней энергии. С учетом этих рассуждений Клаузиус записывает первое начало термодинамики в виде (16), сохранившемся до наших дней.

После того как Клаузиус пришел к математической формулировке первого начала термодинамики, он дает физические пояснения установленного им закона: "Во всех случаях, когда из теплоты появляется работа, - пишет он, - тратится пропорциональное полученной работе количество тепла, и наоборот, при затрате той же работы получается то же количество теплоты". Затем ученый утверждает, что разность $\Delta Q - \Delta A$ всегда постоянна при переходе из одного состояния в другое. Величина ΔU , равная разности теплоты и работы, является функцией только температуры и не зависит от того, каким образом система переходит из начального состояния в конечное.

В последующих рассуждениях Клаузиус разбирает вопрос о том, что совершенная работа будет разной при осуществлении различных процессов. Здесь же он проводит классификацию процессов на обратимые и необратимые, излагает свои рассуждения о механическом эквиваленте теплоты, анализирует способы его определения и приводит числовое значение, найденное им: "Для выделения количества тепла, - пишет ученый, - нужного для поднятия температуры одного килограмма воды на один градус по Цельсию, потребна работа в 423,55 килограммометров".

В этой же главе Клаузиус поддерживает предложение Ранкина о том, что теплоту можно измерять в тех же единицах, что и работу. Это позволило бы упростить ряд теоретических и математических выражений. Но в то же время он понимает, что в те времена в связи со сложившимися в науке традициями принять его предложение практически вряд ли возможно.

Все эти дополнения, уточнения, предложения и формулировки Клаузиуса были приняты учеными, разрабатывающими те же проблемы. Именно Клаузиус одним из первых среди ученых распространил фундаментальный

закон механики на тепловые процессы и понял значение этого закона для развития и становления учения о них.

Первое начало термодинамики, как и закон сохранения и превращения энергии, имеет огромное познавательное значение. Этот закон представляет собой одно из основных положений диалектического материализма. Его установление сопровождалось идеологической борьбой в философии. Немецкий ученый В. Оствальд утверждал в свое время, что все многообразие явлений в природе можно свести к энергетическим изменениям. Им же была выдвинута идея замены понятия материи понятием энергии. Оствальд утверждал, что под понятие энергии можно подвести "все физические явления, данные нам в опыте". Против энергетизма Оствальда резко выступал В. И. Ленин. Ленин показал, что отрыв движения от материи неизбежно ведет к устранению материи и, следовательно, к идеализму: признание существования движения без материи равносильно признанию мышления без источника мысли. "Поэтому оторвать движение от материи равносильно тому, чтобы оторвать мышление от объективной реальности, оторвать мои ощущения от внешнего мира, т.е. перейти на сторону идеализма"¹.

¹ (Ленин В. И. Поли. собр. соч., т. 18, с. 283)

Заклячая разговор относительно первого начала термодинамики и роли Клаузиуса в его становлении, отметим одну из особенностей этого закона. Несмотря на то что первое начало термодинамики представляет собой закон сохранения и превращения энергии для механических и тепловых процессов, утверждать полную тождественность этих фундаментальных положений физики было бы не совсем правильным. Дело в том, что первое начало термодинамики представляет собой вероятностный, среднестатистический закон, применимый только к большому числу однородных объектов. Закон же сохранения и превращения энергии выполняется при любых взаимодействиях как в макро-, так и в микромире, в любых опытах, при участии любого числа объектов. Было бы бессмысленно утверждать, что при взаимодействии двух молекул равенство $\Delta Q = \Delta A + \Delta U$ будет справедливым. Вероятностный характер первого начала как основы термодинамики приводит к выводу, что все явления и законы

термодинамики являются статистическими, о чем будет дополнительно сказано в последующих параграфах.

Клаузиус и второе начало термодинамики

Утверждение в науке первого начала термодинамики разрешило, пожалуй, меньше вопросов, чем возникло в ходе его установления. Наблюдая процессы, осуществляющиеся в газах, было замечено, что если газу предоставить дополнительный объем, то он будет самостоятельно расширяться, занимая все предоставленное ему пространство, но никогда и никому не удавалось наблюдать самопроизвольное сжатие газа. Далее, тело, нагретое до некоторой температуры, всегда охлаждается, нагревая окружающие тела и воздух, но никогда не происходит нагревания исследуемого объекта за счет охлаждения соседних тел или воздуха, хотя этот процесс не противоречит первому началу термодинамики. Или брусок, положенный на наклонную плоскость, скатывается с нее; при этом наблюдается нагревание бруска, плоскости и воздуха. Однако обратный процесс самопроизвольно не осуществляется: брусок сам по себе никогда не поднимется вверх по наклонной плоскости за счет охлаждения его и плоскости.

Приведенных примеров достаточно для того, чтобы понять сущность важнейшей проблемы термодинамики, которую ученым предстояло решить. Необходимо было разобраться в фактах и объяснить, какие из всевозможных процессов осуществимы, какие нет. Необходимо было установить, в каком направлении будет развиваться та или иная термодинамическая система, предоставленная самой себе. Но и это не все вопросы, которые волновали ученых.

Так, при работе тепловой машины Карно часть теплоты должна передаваться холодильнику. Кроме того, в реальной тепловой машине рассеяние теплоты было неизбежным фактом, что являлось причиной необратимости процессов, составляющих ее цикл. Трение, теплопроводность, теплоизлучение - все это приводило к тому, что значительная часть энергии в форме теплоты безвозвратно уходила из системы и никакими способами ее нельзя было использовать для производства работы. Теплоту, переданную холодильнику, никаким образом невозможно обратить в работу в этой же машине. Как оказалось впоследствии, проблема повышения

эффективности работы тепловой машины была неотделима от сформулированных выше. Нужно было ввести какую-то количественную характеристику процессов, которая давала бы возможность оценить ту часть энергии, которая, рассеиваясь, теряет свою ценность как источник работы. Необходимо было связать ее с уже известными физическими величинами. Нужно было научиться вычислять ее для того, чтобы установить, насколько один процесс "необратимее" другого. Зная эту величину, можно было бы разрешить вопрос о том, на сколько КПД данной реальной тепловой машины меньше соответствующего значения для идеальной, работающей в том же температурном интервале. Манипулируя этой величиной, можно было бы узнать направление протекания всех мыслимых процессов и предсказать, какие из них осуществимы в реальных условиях.

Огромная заслуга Клаузиуса состоит в том, что именно ему удалось ввести в физику новую величину, названную им энтропией, использование которой давало возможность ответить на все вопросы, приведенные выше. Второе начало термодинамики представляет собой закон, который регулирует всевозможные процессы, позволяет производить оценку эффективности реальных тепловых машин и осуществляющихся в них процессах. Этот закон и был установлен Клаузиусом. Толкованию этого закона посвящена третья глава его монографии.

Содержание третьей главы не вызывает трудностей при изучении, но объем информации, заложенный в ней, очень велик и математические выкладки несколько громоздки. Попытаемся передать ее содержание современным языком, базируясь на методологических позициях нашего времени. При этом ход рассуждений ученого и его логика несколько не пострадают.

Исходным пунктом рассуждений Клаузиуса при установлении им второго начала термодинамики служит математическое выражение для КПД идеальной тепловой машины Карно. К этому выражению можно прийти следующим образом.

Пусть рабочее тело в процессе изотермического расширения получает от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 и отдает холодильнику количество теплоты Q_2 . Тогда работа,

произведенная машиной Карно за один цикл, будет определяться разностью $Q_1 - Q_2$. Выражая количество теплоты и работу в одинаковых единицах, можно для КПД машины Карно в соответствии с определением записать выражение

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

КПД

где η - КПД тепловой машины.

Так как в изотермических процессах внутренняя энергия, являющаяся функцией только температуры, неизменна ($\Delta U = 0$), то из первого начала следует:

$$\Delta Q = \Delta A.$$

Из первого начала следует

Вычислим работу, совершаемую идеальным газом при его изотермическом расширении. В соответствии с определением работы

$$\Delta A = F \Delta r,$$

Работа

где F - сила давления газа на поршень; Δr - перемещение поршня. Так как $F = pS$, где p - давление газа, являющегося в этом случае рабочим телом; S - площадь поршня, то

$$\Delta A = pS \Delta r.$$

Работа (18)

Произведение $S \Delta r$ представляет собой изменение объема газа под поршнем. С учетом этого выражение (18) можно представить в виде

$$\Delta A = p \Delta V.$$

С учетом этого выражение (18) (19)

Заменяя давление идеального газа его выражением из уравнения Клапейрона для одного киломоля идеального газа

$$p = \frac{RT}{V},$$

Для одного киломоля идеального газа

получим, переходя к бесконечным малым величинам:

$$dQ = dA = \frac{RT}{V} dV.$$

Переходя к бесконечным малым величинам (20)

После интегрирования этого выражения окончательно найдем:

$$Q_{1\text{изотерм.расш}} = A_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

После интегрирования (21)

где T_1 - температура нагревателя, от которого рабочее тело (идеальный газ) принимает теплоту.

Для изотермы, соответствующей температуре T_2 , выражение для работы будет иметь вид:

$$Q_{2\text{изотерм.сж}} = A_2 = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3},$$

Для изотермы (22)

где T_2 - температура холодильника, которому отдается часть количества теплоты, полученной от нагревателя. Работа при адиабатном расширении и сжатии газа в сумме даст нуль.

Используя уравнение Пуассона для адиабатных процессов, можно показать, что

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3}.$$

Для адиабатных процессов (23)

Тогда, подставляя выражения для Q_1 и Q_2 из (21, 22) в (17) и учитывая равенство (23), получим для КПД идеальной тепловой машины Карно выражение

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

КПД идеальной тепловой машины (24)

где T_1 и T_2 - соответственно температуры нагревателя и холодильника.

Таким образом, КПД тепловой машины Карно, как это и утверждал автор, полностью определяется температурами нагревателя и холодильника.

Объединяя выражения для КПД (17) и (24), Клаузиус получает равенство, справедливое для тепловых машин, работающих по обратимому циклу:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Объединяя выражения для КПД (17) и (24), (25)

После несложных преобразований получаем:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

После несложных преобразований (26)

Отношение Q/T Клаузиус назвал приведенной теплотой. Выражение (26) означает: для обратимого цикла, каким

является цикл Карно, сумма величин, равных отношению количества теплоты, переданной или принятой каким-либо из тепловых резервуаров, к температуре соответствующего резервуара, равна нулю. Это утверждение следует из того, что приведенные теплоты, отнесенные к телу или к системе тел, принимающих теплоту, входят в уравнение (26) со знаком "минус". Иначе уравнение (26) может быть представлено в виде

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0,$$

Иначе уравнение (26), (26, а)

т. е. алгебраическая сумма приведенных теплот в машине, работающих по циклу Карно, равна нулю.

В последующем изложении Клаузиус обобщает полученный результат на произвольные обратимые циклы, отличные от цикла Карно. Для этого он предлагает произвольный обратимый цикл разбить бесконечно близко расположенными изотермами и адиабатами на элементарные циклы Карно. Для каждого из элементарных циклов справедливо равенство

$$\frac{dQ}{T} = 0,$$

Для каждого из элементарных циклов (26, б)

где dQ - "порции" теплоты, которыми рабочее тело обменивается с нагревателем или холодильником в элементарном цикле Карно. С учетом этого для произвольного обратимого цикла имеем:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0,$$

Для произвольного обратимого цикла (27)

где кружок на интеграле означает, что суммирование отношений dQ/T производится по замкнутому циклу.

Введение физической характеристики тепловых процессов, представляющей собой отношение теплоты, полученной или отданной, к температуре этого перехода, оказалось очень плодотворным для дальнейшего развития термодинамики. Математически выражение (27) означает, что существует некоторая функция, изменение которой полностью определяется параметрами начала и конца процесса или цикла и не зависит от способа перехода системы из одного состояния в другое. Эта однозначная функция является важной характеристикой термодинамических процессов. На основании вышеприведенных рассуждений Клаузиус предлагает использовать для характеристики тепловых процессов эту функцию, полный дифференциал которой равен отношению dQ/T , т. е.

$$\frac{dQ}{T} = dS,$$

Полный дифференциал (28)

где S - искомая функция состояния, названная Клаузиусом энтропией.

Если термодинамическая система изолирована, т. е. не происходит теплообмена между телами системы и телами, не входящими в нее, то $dQ=0$ и для некоторого обратимого процесса 1 - 2 имеем:

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} = S_2 - S_1,$$

Если термодинамическая система изолирована (28, а)

или

$$S_2 = S_1.$$

Если термодинамическая система изолирована (29)

Полученный результат означает, что в обратимых процессах энтропия системы остается неизменной. Иначе, в обратимых

процессах повышение энтропии одних тел полностью компенсируется уменьшением энтропии остальных тел, составляющих данную термодинамическую систему. Поведение энтропии в реализуемых процессах является одним из способов определения характера данного процесса или цикла: обратимы они или нет и если необратимы, то насколько данный процесс или цикл сильнее отличается от обратимого, чем любые другие. Для того чтобы более четко уяснить сущность излагаемого, рассмотрим поведение энтропии в обратимых и необратимых процессах и циклах.

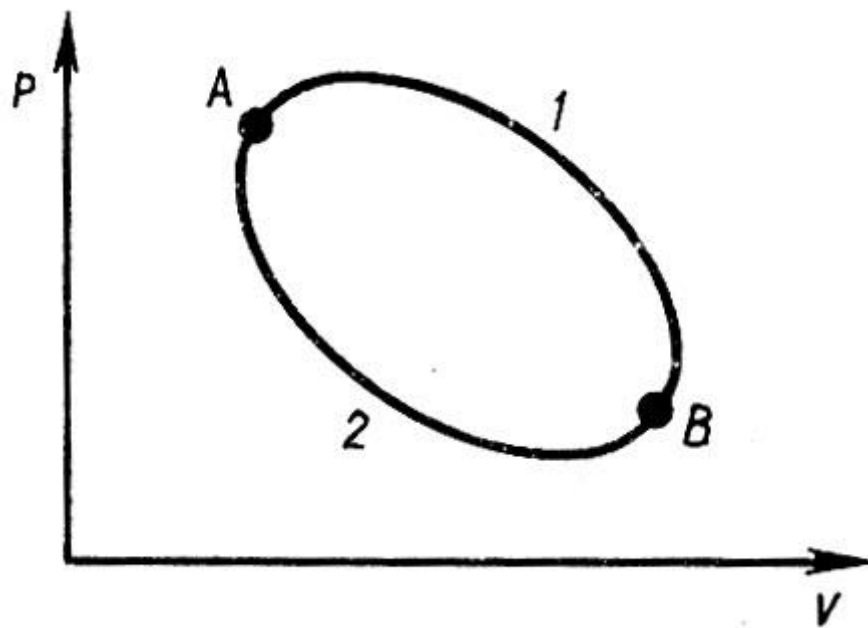


Рис. 8. Пусть некоторая термодинамическая система совершает цикл A1B2A

Пусть некоторая термодинамическая система совершает цикл A1B2A (рис. 8). Если рассматриваемый цикл обратимый, то

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0,$$

Если рассматриваемый цикл обратимый

или после разбиения этого цикла на два процесса

$$\int_{A1B} \frac{dQ}{T} + \int_{B2A} \frac{dQ}{T} = 0.$$

После разбиения этого цикла на два процесса

Перепишем последнее равенство в виде

$$\int_{A1B} \frac{dQ}{T} = - \int_{B2A} \frac{dQ}{T}.$$

Перепишем последнее равенство (30)

Так как процессы A1B и B2A обратимые, то направление обхода B2A можно заменить на обратное и равенство (30) переписать в виде

$$\int_{A1B} \frac{dQ}{T} = \int_{A2B} \frac{dQ}{T}.$$

Так как процессы A1B и B2A обратимые

Следовательно, интеграл

$$\int_{AB} \frac{dQ}{T}$$

Следовательно

не зависит от пути перехода из A в B, а определяется только параметрами начального и конечного состояний.

Так как

$$\int_{AB} \frac{dQ}{T} = \Delta S,$$

Зависимо от пути перехода

то для изолированной системы, совершающей обратимый процесс,

$$\Delta S = S_B - S_A = 0,$$

Для изолированной системы

или

$$S_B = S_A,$$

Для произвольного обратимого процесса

что и было получено выше для произвольного обратимого процесса. Полученное равенство означает, что после завершения обратимого цикла энтропия системы остается неизменной.

Иначе обстоит дело, если цикл, по которому работает тепловая машина, является необратимым. Из ранее приведенных рассуждений следует, что КПД реальной тепловой машины всегда меньше КПД машины Карно:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Сравнение КПД (31)

После преобразования этого неравенства получим:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} < 0,$$

После преобразования

или с учетом правила знаков

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0.$$

С учетом правила знаков (32)

Выражение (32) означает, что приведенная теплота, отнесенная к холодильнику, имеет большее абсолютное значение, чем соответствующая величина для нагревателя.

Рассмотрим тепловую машину, работающую по необратимому циклу. Если процесс B2A предполагать необратимым, то и весь цикл A1B2A будет также необратимым. Для этого случая

$$\int_{A1B} \frac{dQ}{T} + \int_{B2A} \frac{dQ}{T} < 0.$$

Тепловая машину, работающую по необратимому циклу

Так как первый интеграл в правой части этого неравенства записан для обратимого процесса, то его можно заменить в соответствии с (28, а):

$$S_B - S_A + \int_{B2A} \frac{dQ}{T} < 0,$$

Первый интеграл в правой части можно заменить

или

$$\int_{B2A} \frac{dQ}{T} < S_A - S_B.$$

первый интеграл в правой части можно заменить

Если система изолирована ($dQ=0$), то для необратимого процесса получим:

$$Q < S_A - S_B,$$

Для необратимого процесса

или

$$S_A > S_B.$$

Для необратимого процесса (33)

Ввиду того что изменение состояния в системе рассматривается по направлению процесса от В к А, то можно утверждать, что к концу необратимого процесса энтропия системы возросла. Так как описываемый выше процесс рассматривался в общем виде, то отсюда следует общий вывод о возрастании энтропии в необратимых процессах. Иначе, необратимые, реальные процессы развиваются всегда в таком направлении, следование по которому приводит к возрастанию энтропии. К сказанному нужно добавить, что по приросту энтропии можно судить о степени необратимости интересующего нас реального процесса.

В этом месте у читателя возможно возникает недоумение: состояния А и В однозначно определяются параметрами системы, но они отличны, а энтропия, определяемая через эти параметры, имеет одинаковое значение и в А, и в В, если процесс обратимый, и различное, если процесс необратимый. Здесь все дело в том, что графическое изображение процессов А1В и В2А (см. рис. 8) относится к изменению состояния одного из тел термодинамической системы, в данном случае к рабочему телу тепловой машины. В действительности значение энтропии остается неизменным для группы тел, участвующих в тепловых процессах и представляющих собой термодинамическую систему (источник теплоты, источник работы, рабочее тело и др.). Повышение энтропии рабочего тела в обратимых процессах вызывает понижение ее значения в других телах системы.

Все вышеприведенные рассуждения относительно направления протекания процессов с использованием понятия энтропии и составляют сущность второго начала термодинамики. Математически второе начало термодинамики определяется следующим образом: разность энтропий двух состояний системы равна интегралу ($\int dQ/T$) между этими состояниями, если процесс между ними обратимый, и больше этого интеграла, если процесс необратимый.

Высказанные утверждения не означают, что разность энтропии между состояниями 1 - 2 зависит от типа процесса перехода между этими состояниями. Энтропия является однозначной функцией состояния термодинамической системы, и, следовательно, ее изменение для любого процесса, осуществляющегося между этими состояниями, одинаково. Знак неравенства в формуле (32) указывает лишь на то, что в случае необратимого процесса интеграл в левой части уже не выражает собой разность энтропии, а меньше ее, тогда как в обратимых процессах соблюдается равенство суммы приведенных теплот и изменения энтропии.

Второе начало термодинамики представляет собой закон, указывающий направление протекания различных процессов. Используя второе начало термодинамики, можно установить связь между тем количеством теплоты, которое превращается в работу (или получается за счет механической работы), и тем, которое переходит от более теплого тела к более холодному (или наоборот, в холодильных машинах). Существует несколько формулировок второго начала термодинамики, но все они равнозначны и приводят к одинаковым следствиям. В работе Клаузиуса второе начало термодинамики сформулировано так: "Теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более тепловому". А несколько ниже: "Переход теплоты от более холодного тела к более тепловому не может иметь места без компенсации". Эти же мысли Клаузиус выражает в виде правила: "...Дробь Q_1/Q_2 может зависеть только от температуры T_1 и T_2 ". Последняя формулировка наиболее близка к результату, полученному Карно. Все процессы, противоречащие утверждаемому в формулировках, протекали бы с убыванием энтропии, и осуществление их практически невозможно.

Пользуясь информацией, заложенной во втором начале термодинамики, можно теоретически исследовать всевозможные мыслимые процессы. Вычисляя изменение энтропии для интересующих нас процессов, можно узнать, обратим данный процесс или нет. Если значение энтропии в некотором процессе не изменилось, значит, данный процесс является обратимым; если же значение энтропии возросло - необратимым. Нужно отметить, что все реальные процессы протекают всегда с возрастанием энтропии. Чем больше прирост энтропии при переходе из одного состояния в другое, тем дальше данный процесс от обратимого, тем меньше работы производится за счет каждой единицы теплоты в данном процессе, тем меньше КПД данного процесса. Если расчет какого-либо задуманного процесса приводит к тому, что при его протекании энтропия должна убывать, то это означает, что такой процесс практически неосуществим. Таким образом, введение понятия энтропии дало возможность ответить на все те вопросы, которые были сформулированы в начале этого параграфа.

Понимание физического смысла энтропии связано с многочисленными трудностями, возникающими особенно у тех, кто впервые знакомится с этой физической величиной. Однако в действительности новое понятие несколько не труднее других понятий физики. "Энтропия представляется несколько таинственной в том смысле, - пишет известный французский ученый А. Пуанкаре, - что величина эта недоступна ни одному из наших чувств, хотя и обладает действительным свойством физических величин, потому что по крайней мере в принципе вполне поддается измерению". Энтропия как физическая величина характеризует направление протекания того или иного реального процесса. Как следует из приведенных рассуждений, наиболее вероятен такой процесс, при осуществлении которого наблюдается наибольший прирост энтропии. "Энтропия является, следовательно, величиной, - продолжает Пуанкаре, - в некотором роде измеряющей эволюцию данной системы или по крайней мере указывающей направление этой эволюции".

И если до сих пор понятие энтропии приводит в смущение начинающих изучать термодинамику, то можно представить те трудности, которые стояли на пути Клаузиуса при его неустанном, хотя и нелегком, продвижении к истине. Редко кому из ученых выпадает честь ввести новую величину,

характеризующую то или иное свойство. Клаузиус был одним из немногих таких "счастливчиков".

Глава V. Дальнейшие шаги термодинамики

"Тепловая смерть" вселенной

Последовательно развивая основные положения термодинамики, ученые пришли к выводу, реакционному по своей сути и в корне противоречащему материалистическому мировоззрению. Начало положил У. Томсон. В работе "О проявляющейся в природе тенденции к рассеянию механической энергии", опубликованной в 1852 г., он обратил внимание ученых на следствия, которые вытекают из учения Карно. Так, пишет Томсон, при переходе теплоты от одного тела к другому, находящемуся при более низкой температуре, если процесс осуществляется не в идеальной машине Карно, а в реальных тепловых двигателях, происходит общая потеря энергии, которая в дальнейшем не может быть использована. Далее он утверждает, что если теплота образуется при осуществлении необратимого процесса, например при трении, то происходит рассеяние механической энергии и возвращение системы к первоначальному состоянию становится невозможным. К этому следует добавить, что возвращение отнятой от нагревателя теплоты к ее первоначальному значению невозможно вследствие отвода теплоты из системы путем теплопроводности. И наконец, теплота излучения не может быть возвращена к первоначальному состоянию и использоваться для производства работы.

Рассеяние теплоты в окружающее пространство с течением времени приведет к тому, что все тела Вселенной окажутся в состоянии термодинамического равновесия, т. е. температура всех тел станет одинаковой и из имеющейся во Вселенной теплоты никакие другие виды энергии получить не удастся.

Высказанная Томсоном концепция получила в ученом мире название "тепловой смерти" Вселенной. К аналогичным выводам пришел и Клаузиус. Исследуя необратимые процессы, он показал, что при протекании их энтропия всегда увеличивается. А так как энтропия есть мера способности теплоты к превращениям в другие виды энергии, то, рассуждает далее Клаузиус, через некоторое время во

Вселенной должно наступить тепловое равновесие. Он утверждал, что хотя энергия некоторой системы и остается постоянной (первое начало термодинамики), однако с течением времени она лишается способности к превращениям, а значит и способности совершать работу. Это означает, что всякая термодинамическая система со временем "деградирует", наступает "тепловая смерть".

Концепция "тепловой смерти" Вселенной имеет не только физический, но и философский смысл. Нелепые выводы относительно "смерти" Вселенной, конечно же, пришлось по вкусу жрецам религии, так как библейская легенда о сотворении мира и о его конце однозначно получала научное подтверждение. Концепцию "тепловой смерти" с ликованием подхватили не только теологи, но и философы идеалистического толка. Борьба "эмпириков" и теоретиков была борьбой не научных течений, а борьбой двух противоположных мировоззрений. Именно в результате борьбы со сторонниками идеалистического лагеря утвердилось в науке миропонимание, соответствующее действительности. Маркс и Энгельс внимательно следили за развитием естествознания и не случайно первая критика гипотезы "тепловой смерти" была дана Ф. Энгельсом в его работе "Диалектика природы".

Энгельс неоднократно утверждал, что результаты, полученные учеными, строго говоря, противоречат первому началу термодинамики. Дело в том, что в первом начале термодинамики утверждается количественное сохранение энергии, но, продолжает Энгельс, многими совершенно не учитывается тот факт, что энергия сохраняется не только количественно, но и качественно. В силу этого утверждения не могут все виды энергии перейти в тепловую. "*Количественное* постоянство движения, - писал он, - было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь (Клаузиусом, Робертом Майером?). Зато превращение *формы* движения открыто только в 1842 г., и это, а не закон количественного постоянства, есть новое"¹.

¹ (Маркс К., Энгельс Ф. Собр. соч., т. 20, с. 595)

Несмотря на многочисленные попытки материалистически мыслящих ученых найти ошибку в рассуждениях Томсона и Клаузиуса долго не удавалось. Первым ученым, кто разрешил

вопрос о "тепловой смерти", был австрийский физик Л. Больцман. Разрабатывая статистическую трактовку основных положений термодинамики, он пришел к выводу, что результаты Томсона и Клаузиуса неверны. И причин этому несколько. Во-первых, вряд ли справедливым можно считать мнение о том, что Вселенная представляет собой изолированную систему. Во-вторых, второе начало термодинамики вследствие своего статистического характера применимо только к большому числу однородных объектов. Больцман утверждал, что отклонения от второго начала термодинамики возможны, но эти отклонения представляют собой не что иное, как флуктуации состояния. Энтропия может уменьшаться в объемах, содержащих несколько молекул, но для большого коллектива молекул, для макросистемы, теория вероятности предсказывает единственный путь развития - возрастание энтропии. Следовательно, наряду с общей тенденцией к возрастанию энтропии некоторой изолированной системы в отдельных областях ее возможны процессы, протекающие с убыванием энтропии. В-третьих, второе начало термодинамики, по крайней мере его статистическая интерпретация, разработано для молекул, а Вселенная представляет собой другие объекты - планеты, звезды, звездные скопления, галактики и др., и переносить закономерности мира молекул на объекты, составляющие Вселенную, представляется совершенно необоснованным.

Полученные Томсоном и Клаузиусом результаты, строго говоря, противоречат первому началу термодинамики, в котором утверждается неуничтожимость движения, причем не только количественно, но и качественно. Концепция "тепловой смерти" Вселенной, созданная физиками, ими же была и похоронена.

Ф. Энгельс в "Диалектике природы" показал, к каким неприемлемым, антинаучным выводам приводит неправомерное распространение законов термодинамики на всю Вселенную в целом. Он показал, что в теории "тепловой смерти" мира скрывается внутреннее противоречие такого расширения этих законов. Вывод о "тепловой смерти" Вселенной есть в сущности вывод, противоречащий закону сохранения энергии.

Энтропия и вероятность состояния

Известно, что любая система без воздействия на нее извне стремится прийти в состояние, характеризующееся минимумом ее потенциальной энергии. Эта информация позволяет в некоторой мере предсказывать направление протекания того или иного процесса в естественных условиях "без воздействия на тело или систему извне. Кроме того, как показал Клаузиус, реальные процессы всегда развиваются таким образом, что одна из важнейших характеристик состояния системы - энтропия - возрастает. Следовательно, любая термодинамическая система будет развиваться в направлении минимума потенциальной энергии и максимума энтропии. Но не только потенциальная энергия и энтропия могут помочь в определении направления протекания реальных процессов. Существует еще один, статистический, закон природы, в котором утверждается, что наиболее вероятным является состояние с максимальным беспорядком.

Рассмотрим сосуд, состоящий из нескольких соединенных между собой ячеек. Поместим в этот сосуд n молекул, которые могут свободно перемещаться по сосуду из ячейки в ячейку, распределяясь каким угодно образом. Характер этого распределения может быть самым разнообразным. В качестве примера рассмотрим распределение шести молекул в сосуде из трех ячеек. Несложные рассуждения убедят нас в том, что возможны различные способы распределения молекул по ячейкам, часть которых показана на рисунке 9. В качестве примера рассмотрим такую ситуацию. Ящик разделен перегородками на три отсека. Пусть в одном из них находятся молекулы; два других - пустые. Такую систему частиц можно считать упорядоченной. Убрав перегородки между отсеками, мы заметим, что молекулы, участвуя в хаотическом тепловом движении, через некоторое время займут весь предоставленный им объем. Наблюдая далее, мы увидим, что молекулы перераспределились так, что в каждом из отсеков содержится примерно одинаковое число молекул, хотя неизбежны и некоторые отклонения - флуктуации, которые будут тем меньше, чем больше исходное число молекул в ящике. Таким образом, система, предоставленная самой себе, приходит в наиболее вероятное состояние: одинаковое число молекул в каждом отсеке. Этот процесс перераспределения развивается в таком направлении, следуя которому энтропия возрастает; при этом система приходит к наиболее вероятному

состоянию. Иначе, возрастание энтропии связано с увеличением вероятности состояния. Количественной характеристикой вероятности того или иного состояния является термодинамическая вероятность, которая представляет собой не что иное, как число способов, которыми может быть реализовано состояние данной физической системы. Распределение, соответствующее рисунку 9, является наиболее вероятным.

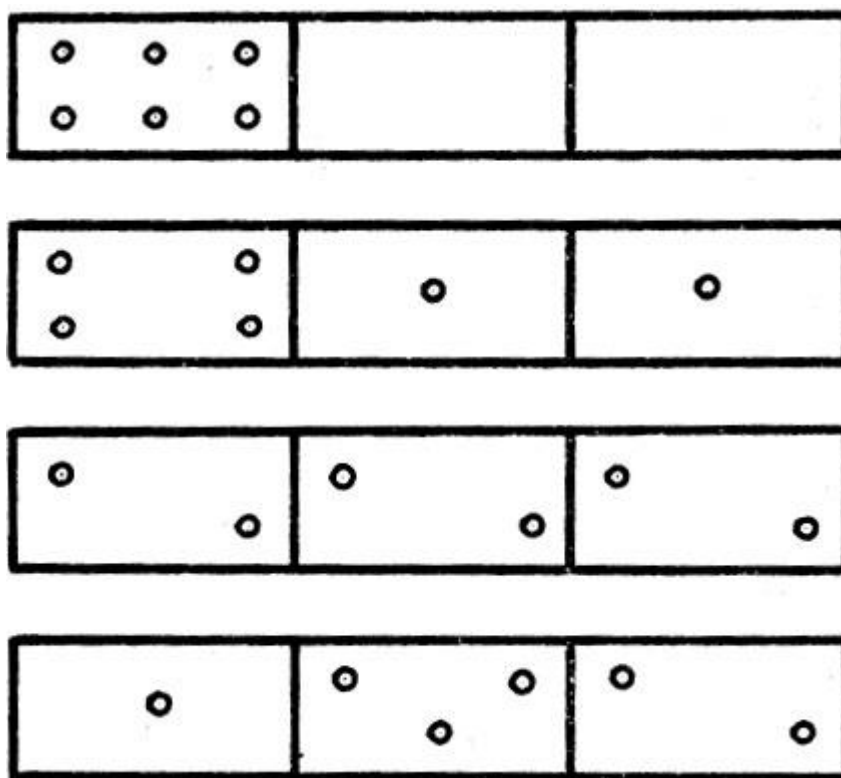


Рис. 9. Способы распределения молекул по ячейкам

Изучая термодинамические процессы, Больцман заметил общность в направлении изменения энтропии некоторой системы и в значении термодинамической вероятности состояния. Он установил, что энтропия некоторой термодинамической системы пропорциональна логарифму вероятности ее состояния. Повышение энтропии означает нарушение упорядочения, стремление системы к хаотическому движению частиц, ее образующих. Согласно теоретическим исследованиям Больцмана

$$S \sim \ln W,$$

Согласно теоретическим исследованиям Больцмана (34)

где S - энтропия системы; W - термодинамическая вероятность ее состояния.

Развивая далее представления Больцмана о связи энтропии и вероятности состояния, немецкий физик М. Планк нашел коэффициент пропорциональности в соотношении (34) и получил равенство

$$S = k \ln W,$$

Коэффициент пропорциональности (35)

где k - константа, получившая впоследствии название постоянной Больцмана.

Из работ Больцмана и Планка следует, что второе начало термодинамики, так же как и первое, является статистическим законом. Второе начало термодинамики справедливо только для большого числа молекул, к которому можно применить статистические методы. Установленный Клаузиусом закон возрастания энтропии следует понимать как среднестатистический вывод. В отдельных частях системы могут протекать процессы, развивающиеся так, что энтропия этой части системы может убывать, хотя в целом макросистема характеризуется ростом энтропии. Эти флуктуации энергии, плотности, температуры непрерывно возникают и исчезают через сравнительно малые промежутки времени. Наиболее вероятное состояние означает то, что система находится в состоянии термодинамического равновесия. Соотношение между энтропией и термодинамической вероятностью позволяет утверждать, что энтропия представляет собой меру близости изолированной системы к состоянию термодинамического равновесия.

Применение термодинамических методов

Создание и развитие термодинамики способствовало дальнейшим теоретическим исследованиям свойств вещества. Ученые, инженеры, конструкторы, используя полученные термодинамические выводы, успешно разрабатывали теорию поршневых двигателей внутреннего сгорания. Мощный толчок в развитии получила теория газотурбинных установок, реактивных двигателей, атомных электростанций. Не менее важным применением законов термодинамики представляются

исследования и разработка методов прямого преобразования внутренней энергии в электрическую - термобатареи, магнитогидродинамические генераторы. Без применения термодинамических методов невозможно было бы решать также вопросы эффективности термодинамических циклов, осуществляющихся в тепловых и холодильных установках. Большое значение для практики имели исследования теплопроводности, излучения, теплотехнических свойств вещества, осуществленные с применением термодинамических методов.

Кроме чисто технических аспектов приложения термодинамики важными являются результаты, полученные с применением новых методов в химии. Возникла новая ветвь науки - химическая термодинамика, в задачу которой входит исследование зависимости термодинамических свойств веществ от их состава, строения и условий существования, различных химических процессов, свойств растворов, в частности электролитов, термодинамических поверхностных явлений и др.

Универсальный характер термодинамических законов позволил предсказать ряд явлений, открытых впоследствии экспериментально. Именно использование термодинамических методов способствовало пониманию процессов намагничивания, некоторых свойств диэлектриков, термоупругих свойств вещества.

Прикладное направление в термодинамике активно развивали У. Томсон, Р. Клаузиус, Л. Больцман, М. Планк и ряд других исследователей. В 1821 г. голландским физиком Т. Зеебеком (1770 - 1831) было открыто явление термоэлектричества, заключающееся в том, что в цепи из разнородных металлов, контакты между которыми поддерживаются при различных температурах, возникает электродвижущая сила, получившая название термоэдс. Спустя некоторое время (1834) французский исследователь Ж. Пельтье (1785 - 1845) обнаружил обратное явление: возникновение разности температур в местах спая двух разнородных металлов при пропускании по цепи тока. Объяснение этих явлений было дано Томсоном с использованием термодинамических методов. В частности, Томсон рассматривал горячий спай термогенератора как нагреватель, холодный - как холодильник и распространил на

этот преобразователь энергии выводы, полученные Карно для тепловых машин, позволяющие оценить КПД этого устройства. Исследуя вопросы термоэлектричества, Томсон нашел связь коэффициента Пельтье, абсолютной температуры и термоэдс, подтвержденную впоследствии экспериментально.

Также теоретически, используя термодинамический метод, Томсон предсказал эффект, названный впоследствии его именем, заключающийся в том, что в проводнике, вдоль которого имеется перепад температур, должна выделяться теплота, дополнительно к джоулевой. И это утверждение Томсона вскоре нашло экспериментальное подтверждение.

В 1853 г. Томсон пришел к выводу, что при медленном адиабатном протекании газа сквозь пористую перегородку должно наблюдаться изменение его температуры. Этот эффект, эффект Джоуля - Томсона, и в настоящее время широко применяется в холодильной технике для сжижения газов.

Не менее плодотворными оказались приложения термодинамического метода для объяснения и других свойств вещества.

Значительный вклад в решение ряда практических вопросов внесли русские физики. В работе "Исследования по математической физике" Б. Б. Голицын (1862 - 1916) провел широкие теоретические исследования явления электрострикции, заключающегося в деформации диэлектриков, помещенных в электрическое поле. Именно в его изысканиях термодинамическая теория диэлектриков получила всестороннее развитие. Н. А. Умов, рассматривая твердое тело как совокупность материальных точек, получил соотношение между температурными напряжениями и деформациями. Также наш соотечественник Н. Н. Шиллер, используя первое и второе начала термодинамики, получил выражение для теплоемкости тел.

Стоит отметить и тот факт, что именно термодинамические выводы привели Кирхгофа к открытию закона о пропорциональности лучеиспускания и лучепоглощения. Дальнейшее развитие этого вопроса - поиск аналитического выражения кривой теплового излучения - привело Планка к гипотезе квантов и далее - к созданию современной физики квантовой механики.

В настоящее время термодинамический метод широко применяется для объяснения экспериментально установленных фактов и способствует предсказанию новых явлений и эффектов. Термодинамический подход широко используется учеными при создании новых материалов с заданными конструкционными свойствами и при изучении их характеристик, что важно в любой отрасли промышленности и техники.