

УДК 53:378.6.091.27

Смык Александра Федоровна, д-р физ.-мат. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, afsmyk@mail.ru

ТЕОРИЯ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ В ТРУДАХ С. КАРНО И Б. КЛАПЕЙРОНА

Аннотация. В статье рассмотрены достижения и вклад в развитие классической термодинамики двух французских ученых С. Карно и Б. Клапейрона. Показано, что, основываясь на неверных представлениях о природе теплоты, используя ряд аналогий, С. Карно сумел получить правильную феноменологическую теорию идеальной тепловой машины. Опубликованная книга и дневники С. Карно позволяют утверждать, что он дал первые формулировки не только второго, но и первого начала термодинамики. Заслугой Б. Клапейрона является дальнейшее развитие идей С. Карно. На основании первоисточников в статье обращается внимание на несоответствие названий известных законов и авторов, впервые их открывших. Объединенный газовый закон впервые был получен С. Карно, а Б. Клапейрон в своей работе использовал этот закон, но ничего нового он в него не внес.

Ключевые слова: С. Карно; Б. Клапейрон; принципы термодинамики; тепловая машина; теория теплоты; объединенный газовый закон.

Smyk Alexandra F., Dr. Sc., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky prosp., Moscow, 125319, Russia, afsmyk@mail.ru

HEAT ENGINE THEORY IN THE WORKS OF S. CARNOT AND B. CLAPEYRON

Abstract. The article discusses the achievements and contributions to the development of classical thermodynamics of S. Carnot and B. Clapeyron. It is shown that, based on misconceptions about the nature of heat, using a number of analogies, S. Carnot was able to obtain the correct phenomenological theory of an ideal heat engine. The published book and diaries of S. Carnot allow us to state that for the first time he formulated not only the second, but also the first law of thermodynamics. The merit of B. Clapeyron is the further development of the ideas of S. Carnot. Based on the original sources, the article draws attention to the discrepancy between the names of well-known laws and the authors who discovered them for the first time. The united gas law was first obtained by S. Carnot. Clapeyron used this law in his work, but he did not introduce anything new into it.

Key words: S. Carnot; B. Clapeyron; principles of thermodynamics; heat engine; heat theory; united gas law.

Введение

В современных курсах физики практически нет места для изложения путей и достижений ученых, заложивших фундамент классической

физики. Их ошибки, поиски верных решений, гениальные озарения, развитие их идей следующими поколениями остаются, как правило, за рамками учебной литературы. В ней мы получаем законы и формулы в готовом виде, которые соответствуют сегодняшнему уровню развития естествознания. Но эволюцию идей в физике и логику ее развития, которые будят воображение и учат, мы не видим при полном господстве дедуктивного построения учебного курса общей физики.

Физические основы термодинамики являются неотъемлемой частью любого учебника по физике. В целом в естествознании термодинамика занимает особое место как по общности своих основных принципов, так и по значению и влиянию на развитие техники и технологий. Логика внутреннего развития термодинамики начинается с первых гипотез о природе теплоты, которые позже привели к открытию принципа эквивалентности теплоты и работы и созданию теории тепловых машин. Рассматриваемая область естествознания зародилась вместе с накоплением опытных фактов и наблюдений и является примером индуктивного метода в истории развития классической физики. В этой истории важное значение имеют труды двух французских инженеров-физиков, выпускников знаменитой Политехнической школы в Париже (Ecole Polytechnique) Сади Карно и Бенуа Клапейрона. В настоящей работе представлены достижения и роль С.Карно и Б.Клапейрона в области создания теории тепловой машины, установления фундаментальных принципов термодинамики, а также обращено внимание на ряд несоответствий, широко распространенных в отечественной учебной литературе, которые связаны с неточностями в названии первых авторов известных законов. Источниковую базу составили монографии отечественных ученых, посвященные истории физики, биографические очерки, а также первоисточники – перевод на русский язык книги С. Карно, английский перевод работы Б. Клапейрона.

**«Он был одним из наиболее оригинальных и глубоких
мыслителей»**

Такими словами о Сади Карно написано в его биографии в Британской энциклопедии. Выпустивший за свою короткую жизнь лишь одну научную работу, он остался в истории физики одним из гениальных первооткрывателей термодинамики. Сади Николай Леонард Карно (Carnot Sadi Nicolas Léonard) родился 1 июня 1796 г. в Париже. В 16 лет Сади Карно поступил в Политехническую школу, которую окончил в 1814 г. и получил назначение в инженерные войска. Во время пребывания на военной службе С. Карно усиленно занимался научными исследованиями в области теории тепла, изучил во всех тонкостях устройство паровой машины Уатта, которая впервые в совершенно реальной форме доказала возможность получения работы за счет сжигания топлива. Карно оставил военную службу в 1828 г. с намерениями продолжить развитие своих первоначальных идей, но его жизнь оборвалась 24 августа 1832 г. Почти не имея никаких предшественников и единомышленников, Карно сумел изложить теоретические основы работы тепловой машины, сформулировал новую точку зрения на природу тепла и эквивалентности тепла и работы.

Для того, чтобы понять генезис идей Карно надо обратиться к его образованию, обстоятельствам личной жизни. Политехническая школа готовила специалистов для инженерной работы, а наиболее способные могли заниматься теоретическими исследованиями в области точных наук. В разные годы Политехническую школу окончили А. Ампер, Д. Араго, Ж. Био, Ж. Гей-Люссак, О. Коши, Б. Клапейрон, Ж. Фурье, Г. Кориолис, С. Пуассон, О. Френель и много других известных деятелей науки. Об уровне полученного образования говорит список учебных работ, выполненных С. Карно, который хранится в архивах Политехнической школы: реферат о задачах начертательной геометрии; реферат о машинах

для производства стеклянных трубок; реферат по проектам временных фортификационных сооружений; проект постоянного фортификационного сооружения; строительство завода; работа по тригонометрии; проект гидравлической конструкции для большого подъемного моста [1. С. 36].

Примером и образцом для Сади Карно был его отец Лазар Карно, известный математик и механик, который занимался домашним воспитанием сына до поступления в лицей, и вероятно определил его научные интересы, поскольку сам получил выдающиеся результаты в области установления закона сохранения механической энергии и работы идеальной механической машины. В рассуждениях С. Карно можно увидеть использование аналогий в работе машин – тепловых машин и водяного двигателя, поскольку Сади был хорошо знаком с работами своего отца в области механических двигателей [2].

В июне 1824 г. парижский издатель Башелье за счет автора напечатал тиражом 600 экземпляров небольшую книжку капитана инженерных войск С. Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», которая стала первой и единственной научной работой 28-летнего С. Карно. В истории физики трудно найти другую научную работу, имеющую столь длительный период забвения, без которой спустя почти два века после ее опубликования не обходится ни один учебник классической физики, она цитируется во всех монографиях по теплотехнике и термодинамике. История издания труда С. Карно укладывается в несколько строчек: 1824 г. – первое издание «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу»; 1878 г. – второе издание выпущено братом И. Карно; 1927 г. – издание записных книжек С. Карно, которые датированы 1830 г.; 1923, 1934 г. – издание книги С. Карно на русском языке в серии «Классики точных наук» [3].

История опубликования научного труда С. Карно, а также его записных книжек рассмотрена Л. Бриллюэном в [4]. Работа Карно, написанная почти двести лет тому назад, удивляет своим доступным, ясным и точным языком. В самом начале Карно формулирует цель своих исследований: *«Несмотря на работы всякого рода, предпринятые относительно паровых машин, несмотря на удовлетворительное состояние, в которое они теперь приведены, их теория весьма мало продвинута и попытки их улучшить почти всегда руководствовались случаем»* [3].

При чтении работы Карно следует иметь в виду, что по его представлениям теплота являлась не энергией, а невесомым веществом, которое называли теплородом. В науке того времени считалось, что наличие теплорода в большем или меньшем количестве обуславливает температуру тела. При соприкосновении двух тел теплород может переливаться с одного из них на другое. В своей книге Карно придерживается этого взгляда на природу теплоты, хотя позже в своих дневниках он выдвигает иную точку зрения – *«Тепло не что иное как движущая сила, или вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел»* [5. С. 62]. Эти высказывания Карно относятся к 1830 г., но они оставались никому неизвестны. Представление о вещественном характере теплоты сохранялось в физике вплоть до 1842 г., когда Ю.Р. Майером была опубликована работа, в которой утверждался переход теплоты в работу и обратно, и был приведен механический эквивалент теплоты. Установление закона сохранения и превращения энергии в термодинамике, получившего название первого начала термодинамики, связано кроме Майера с именами нескольких ученых – Д.П. Джоуля, Г. Гельмгольца, Л.А. Кольдинга [6, 7]. Карно также пытался установить количественное соотношение между совершенной работой и выделившимся теплом. В своих дневниках он оставил запись:

«По некоторым представлениям, которые у меня сложились относительно теории тепла, создание единицы движущей силы требует затраты 2,7 единицы тепла» [8]. На сегодняшний день механический эквивалент теплоты служит не только для перевода внесистемных единиц в единицы СИ ($1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$), но и является своего рода фундаментальной физической константой.

Представления Карно о теплоте ошибочны, но выводы его совершенно правильны. Можно считать, что эта теория была исторически необходимым этапом в развитии термодинамики, ее положительная роль заключалась в объединении разрозненных фактов и систематизации их. Теория теплорода в некоторой степени упростила работу Карно, дала возможность ему построить целый ряд аналогий, придающих наглядность его рассуждениям. Многие термины, содержащиеся в книге Карно, используются и в современной литературе: тепловой перепад, разница уровней, тепловой порог.

Объединенный газовый закон Карно-Клапейрона

В истории установления уравнения состояния идеального газа, которое в отечественных учебниках носит имя Менделеева-Клапейрона, роль С. Карно значительна, но о ней не принято даже упоминать в учебной литературе по физике. В работе [9] показано, что это уравнение явилось результатом длительной эволюции физики, начиная с экспериментальных исследований зависимости объема воздуха от давления в 1659 г. Р. Бойля и Р. Тоунлея, а также формулировки в 1676 г. Э. Мариоттом положения о том, что «сжатие воздуха происходит пропорционально весу, которым он сжимается». Позже в 1802 г. Ж.Л. Гей-Люссак и Дж. Дальтон нашли одно и то же численное значение коэффициента теплового расширения газов, равное $1/267$ на 1° . Эти зависимости для сжимаемости и теплового расширения газов были хорошо известны С. Карно и он использовал их

при обсуждении вопроса о работе расширения газа в своей книге «Размышления о движущей силе огня...». Карно был первым, кто объединил законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака в формуле

$$V = C \frac{267 + t}{p},$$

где « C – постоянная величина, зависящая от веса пара и выбранных единиц» [3. С. 41]. Далее он еще раз использовал объединенный газовый закон в виде

$$p = N \frac{t + 267}{V},$$

в котором коэффициент N отнесен к массе газа, занимающей объем 1 л при 0°C . Через 10 лет в 1834 г. Б. Клапейрон привел объединенный газовый закон в виде

$$pV = \frac{p_0 V_0}{267 + t_0} (267 + t),$$

а также в виде

$$pV = R(267 + t).$$

Параметр в этом уравнении относился к единице массы газа и не являлся универсальной величиной. Как видно, формулы Клапейрона совершенно идентичны формулам Карно, но поскольку оригинальная работа Карно была мало известна, ее узнали через изложение Клапейрона, то в середине 19 в. в научном мире утвердилось мнение о том, что объединенное уравнение состояния для газов выведено Клапейроном. Далее были установлены отклонения от этой зависимости для определенных газов и в физике появилось понятие «идеальный газ» (этот термин принадлежит Р. Клаузиусу), для которого выполняется уравнение Клапейрона. А после введения В. Томсоном в 1848 г. абсолютной термодинамической температуры T и установления тождества газовой и термодинамической температурных шкал благодаря Клаузиусу

и Томсону уравнение Карно-Клапейрона получило современный вид уравнения состояния идеального газа

$$pV = RT,$$

где константа R имеет тот же вид, что у Клапейрона, но совершенно другой смысл – это универсальная газовая постоянная.

Феноменологическая теория тепловой машины

Во времена Карно уже получили широкое распространение паровые машины, он был хорошо знаком с изобретениями Ньюкомена и Дж. Уатта, и более поздних изобретателей. Свои знания Карно развивал, пользуясь английскими источниками, сведениями из Британской энциклопедии. В промышленности того времени применялись даже двухцилиндровые паровые машины, создавались проекты тепловых машин, подобных двигателям внутреннего сгорания, но теория этих машин была совершенно не изучена. Модель идеальной тепловой машины, предложенной Карно, представлена на рис. 1.

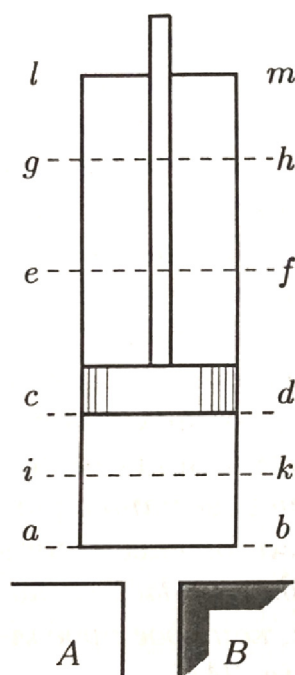


Рис. 1. Схема из книги С. Карно, изображающая циклический процесс с воздухом в цилиндре

Карно пишет: *«Представим себе упругую газообразную среду, например, атмосферный воздух, заключенную в цилиндрический сосуд $abml$, закрытый подвижной диафрагмой или поршнем cd ; кроме того, представим два тела A и B , поддерживаемые при постоянной для каждого температуре, причем A при более высокой, чем B ; затем вообразим ряд операций»*. Тело A Карно назвал нагревателем, тело B – холодильником. Тело A приводится в тепловой контакт с воздухом, заключенном в сосуде. Воздух будет иметь температуру тела A , cd – положение поршня к этому моменту. Поршень под давлением расширяющегося воздуха поднимается и занимает положение ef . Затем в условиях изоляции воздух продолжает расширяться, этот процесс является адиабатическим и его уравнение уже было получено Пуассоном, но Карно не пользуется этим термином. В этом процессе температура понижается пока не достигнет температуры тела B , в этот момент поршень занимает положение gh . Благодаря контакту с телом B воздух продолжает сжиматься и достигает положения cd . Воздух, изолированный от тела B , сжимается, и поршень переходит в самое нижнее положение ik . После соприкосновения с телом A поршень возвращается в положение ef . Затем повторяются все шаги, описанные выше. Карно делает вывод: *«Операции, которые здесь описаны, могут быть проведены в одном направлении или в обратном»*.

Карно описал цикл, который теперь носит его имя, это было первое описание идеализированного цикла тепловой машины. Метод циклов, введенный в науку С. Карно, послужил основой для вывода многих термодинамических закономерностей. Карно писал, что полная теория для тепловых машин отсутствует пока *«законы физики не будут достаточно расширены и достаточно обобщены, чтобы наперед можно было предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело»* [3. С. 9]. Новая, прикладная по замыслу Карно, наука была

названа В. Томсоном в 1854 г. «термодинамикой». Поскольку Карно поставил себе цель создать модель идеальной тепловой машины, перед ним стояла задача минимизировать потерю работы при теплопередаче. Он ввел в науку фундаментальное понятие – идеальное термическое взаимодействие. Он пошел тем же путем что и его отец Л. Карно при разработке идеальной модели машины в механике. *«Чтобы обусловить переход теплорода от одного тела к другому, первое из них должно иметь более высокую температуру, но разность температур можно взять сколь угодно малой; в теории ее можно считать за нуль без того, чтобы рассуждения потеряли в точности»* [3]. Именно такой подход, основанный на бесконечно малой разности температур, Сади Карно использовал при построении цикла. Карно связал увеличение эффективности теплового двигателя не просто с наличием давления рабочего тела, а с его температурой.

Карно сформулировал принцип, который представляет собой утверждение о невозможности существования вечного двигателя: *«недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезной... повсюду, где существует разность температур... возможно получение движущей силы»* [3. С. 22]. К принципу Карно о том, что неизменным условием превращения теплоты в работу является наличие нагревателя и холодильника, то есть разности температур, обратились в 1850 г. Р. Клаузиус и в 1849–1851 гг. В. Томсон. Они показали, что этот принцип является самостоятельным законом природы, получившим название второго начала термодинамики. История его установления прослежена в многочисленных историко-научных работах, посвященных развитию идей термодинамики [10].

В записной книжке Карно, которую он вел после опубликования «Размышлений...» с намерениями написать позже более подробно,

содержится неявное изложение первого начала термодинамики и расчет механического эквивалента тепла (с ошибкой лишь в 15%), а также набросок кинетической теории и механизма теплового движения.

В ней содержатся следующие утверждения: *«Тепло может представлять собой колебательное движение молекул. Если это так, то количество тепла – это не что иное, как та механическая энергия, которая необходима, чтобы привести молекулы в колебательное движение. Тепло является движением... Полная энергия существует в природе в определенном постоянном количестве. Она не появляется и не исчезает; она просто принимает другую форму... Чтобы получить единицу механической энергии, необходимо затратить 2,7 единиц тепла»* [4. С. 338].

Анализируя работу паровой машины, Карно пишет: температура сгорания, до которой нагревают газ очень высока, температура охлаждения – это температура используемой воды. Но третий принцип, который он выдвигает, мешает использовать большие разности температур. Он предвосхищает некоторые важные положения технической термодинамики: *«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 при расширении колоссального объема. Оба условия – трудновыполнимые»* [3. С. 53]. Карно рассматривает усовершенствования в паровых машинах, которые сделал Уатт, а также построенную в Лондоне Перкинсом паровую машину, в которой пар в цилиндр поступает при высоком давлении 35 атм., и обосновывает преимущества машин высокого давления: *«Отличительным признаком хорошей паровой машины является не только употребление пара высокого давления, но и использование его давления, меняющегося и непрерывно убывающего в весьма широких*

пределах» [3. С. 54]. Карно анализирует только появившиеся в 1820-е гг. многоцилиндровые тепловые машины, упоминает машины без конденсатора с непосредственным выхлопом в атмосферу, пригодные для транспортных средств. В книге Карно также рассматривается использование воздуха в качестве рабочего тела. Среди прочего он отмечает возможность нагрева воздуха не через стенку сосуда, а при сжигании топлива непосредственно в нем. И даже Карно предлагает путь, очень близкий к тому, по которому в дальнейшем развивались двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины: «Нам казалось бы более выгодным ... сперва сжать воздух насосом, затем пропустить его через вполне замкнутую топку, вводя туда малыми порциями топливо... затем заставить воздух выполнить работу в цилиндре с поршнем или в любом другом расширительном устройстве, и наконец, выбросить его в атмосферу...».

Карно был сделан вывод о независимости движущей силы от рода рабочего вещества. Вывод из этой теоремы Карно сделан В. Томсоном в 1848 г. в работе «Об абсолютной термодинамической шкале температур, найденной из теории Карно о движущей силе огня и вычисленной из наблюдений Реньо». Если теорема Карно справедлива, то должна существовать такая температурная шкала, на которой значения температур независимо от рода вещества, определяли бы количество теплоты, полученной или отданной этим веществом при совершении им кругового процесса, это абсолютная температура T [12].

Карно изучал количественную сторону процесса взаимопревращения теплоты и работы и вычислял произведенную работу при получении от нагревателя единицы теплоты для трех агентов – воздуха, водяного пара и спирта. Он показал, что отношение работы к теплоте, полученной от нагревателя, не зависит от природы рабочего тела, а является только функцией температуры:

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

где A – произведенная работа; Q – теплота, полученная от нагревателя; Δt – температурный интервал. Это отношение представляет собой коэффициент полезного действия тепловой машины, который определяется только неизвестной функцией температуры C , получившей название функции Карно. Установить вид функции Карно не смог. Дальнейшие исследования Томсона, Клаузиуса показали, что функция Карно представляет собой не что иное как абсолютную температуру $C = T = t + 273^\circ$. С учетом этого формулу для КПД теплового двигателя, работающего в температурном интервале $\Delta T = T_1 - T_2$, Томсон записал в виде

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

Достижения Б. Клапейрона

Роль Бенуа Поля Эмиля Клапейрона (1799–1864) в истории физики представляется весьма скромной. Общепринято, что в области термодинамики им установлен вид уравнения состояния идеального газа и получено уравнение фазового перехода, обобщенное впоследствии Р. Клаузиусом. Среди причин такого мнения о роли Клапейрона в развитии термодинамики можно считать мнение самого ученого о том, что он только развивает идеи Карно. В своей работе «Размышления о движущей силе огня», название которой почти совпадает с названием работы Карно, Клапейрон не проводит четкой границы между своими результатами и тем, что сделал Карно. Постараемся ответить на вопрос: какие конкретные достижения получены Клапейроном и в чем заключаются его заслуги перед физикой?

Во-первых, Клапейрон стал тем человеком, который проделал работу, описанную великим В. Гете: «Значительное открытие задает хлопоты множеству людей, которые сперва должны узнать его, потом понять, потом отработать по-своему и передать дальше» [13]. Клапейрон так же, как и С. Карно, только двумя годами позже, окончил Политехническую школу, получив глубокое теоретическое образование и навыки в прикладных областях [5, 14]. В 1821 г. Клапейрон был приглашен преподавать в созданный по указу Российского императора Александра I Корпус инженеров путей сообщения [15]. Он стал заведовать кафедрой прикладной математики и химии, в сферу его научных интересов входили паровые машины, по которым он подготовил и издал первое в России пособие «Прикладная механика» на французском языке. За десять лет преподавания в Петербурге Клапейрон опубликовал ряд серьезных работ, среди них курс паровых машин. Самую важную работу Б. Клапейрона «Размышления о движущей силе огня» постигла почти та же судьба, что и книгу С. Карно. Она была опубликована в 1834 г. в «Journal de l'Ecole Polytechnique». В 1843 г. переведена на немецкий язык в «Annalen der Physik und Chemie». Ее издатель писал: «Это сочинение, привлекавшее до сих пор мало внимания, показало уже теперь свою значительность и полное право на успех» [16]. А в 1847 г. был сделан перевод на английский язык [17].

Фактически одновременно с Карно Клапейрон занимался вопросами работы и эффективности тепловых машин, его курс лекций был размножен в 1828 г. и стал первым учебным пособием по паровым машинам, изданным в России. Клапейрон пишет: *«С. Карно избегал употребления формального математического языка и поэтому пришел через ряд тонких, но трудно понимаемых умозаключений к ключевым выводам, которые без труда могут быть выведены, как я покажу далее, из общих*

законов. Однако я предварительно считаю необходимым обсудить главную гипотезу, которая служит основой исследования Карно и которая будет моим исходным пунктом» [16].

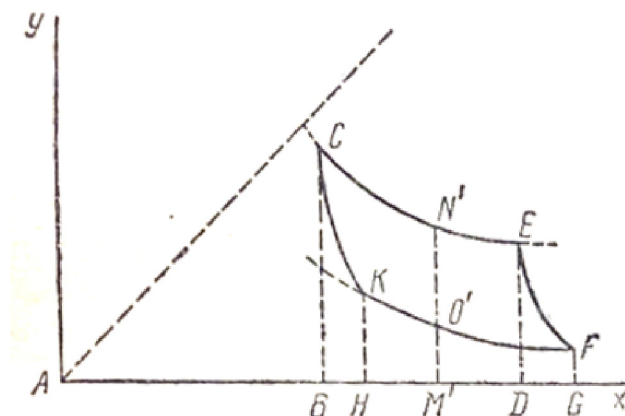


Рис. 2. График цикла Карно (по Клапейрону)

На рисунке 2 представлен график цикла Карно на диаграмме x – y , который содержится в книге Клапейрона. Точкой C представлено состояние газа, который приведен в контакт с телом постоянной температуры. По оси x отложены значения удельных объемов v (отношение объема цилиндра к весу пара в нем), занимаемых газом в ходе цикла, а по оси y – его давление. Процесс расширения газа при постоянной температуре изображен гиперболой CE . Дальнейшее расширение газа, заключенным в теплонепроницаемую оболочку, будет сопровождаться уменьшением температуры, давление будет изменяться быстрее, чем это следовало бы из закона Бойля-Мариотта. «В этом случае изменение объема подчиняется некоторому неизвестному закону, который геометрически может быть представлен линией EF » – пишет Клапейрон [Цит. по 1. С. 148]. Он отвергал работу Пуассона об адиабатическом процессе и считал неизвестным закон, по которому следует участок EF . Далее следует опять гипербола FK , и завершается круговой процесс вдоль линии KC , описывающей ту стадию сжатия газа, которая протекает без обмена теплотой с более холодным телом. При этом температура,

давление и объем принимают первоначальные значения. В полном соответствии с теорией теплорода, которой так же, как и Карно, придерживался Клапейрон, при совершении цикла затраты теплорода не происходит. Работа совершается в результате падения теплорода с более высокого температурного уровня на более низкий. И эта работа на диаграмме Клапейрона равна площади фигуры $CEFK$. Надо отметить, что графический метод Клапейрона можно рассматривать как аналогию индикаторной диаграмме Уатта, где по осям откладывались давление и ход поршня. Поскольку ход поршня пропорционален объему цилиндра, то оставалось сделать один шаг – заменить на оси абсцисс объем V удельным объемом v .

Клапейрон впервые систематически ввел в рассмотрение бесконечно малые квазистатические циклы, развив идею, только обозначенную Карно. Такой подход к термодинамическим процессам позволил Клапейрону использовать язык дифференциального исчисления. Впервые дифференциальные соотношения в термодинамике были применены Пуассоном при исследовании адиабатического процесса. Клапейрон установил термодинамическое уравнение, описывающее поведение перехода вещества из одной фазы в другую. Независимо этот же результат был получен Р. Клаузиусом [18]. Согласно уравнению Клапейрона-Клаузиуса теплота фазового перехода (например, теплота испарения или теплота плавления) при квазистатическом процессе определяется формулой

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T\Delta V},$$

где p – давление; T – температура; L – удельная теплота фазового перехода, ΔV – изменение удельного объема. В 1849 г. Дж. Томсон, пользуясь формулой Клапейрона, пришел к выводу, что точка замерзания воды должна зависеть от давления [19]. Также Клапейрон строго вывел

уравнение, связывающее теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме [5]

$$c_p - c_v = \frac{R}{267 + t} C.$$

Заключение

К числу заслуг Карно относится изобретение им нового, феноменологического метода рассмотрения процессов взаимного превращения теплоты и работы в макроскопических системах. Им впервые была представлена теория тепловой машины и сформулирован фундаментальный принцип, получивший название принципа Карно или второго начала термодинамики. Без работы Карно, без ее интерпретации Клапейроном и детальной разработки идей Клапейрона Томсоном и Клаузиусом, без исследования свойств газов и паров и открытия закона сохранения и превращения энергии – первого начала термодинамики – невозможно было бы дальнейшее развитие классической термодинамики. Уравнение состояния идеального газа, которое называют уравнением Менделеева-Клапейрона, впервые было получено С. Карно.

Список литературы

1. Бродянский, В.М. Сади Карно – основатель термодинамики / В.М. Бродянский. – М.: Физматлит, 2004. – 184 с.
2. Спасский, Б.И. К истории открытия теоремы Карно / Б.И. Спасский, Ц.С. Сарангов // УФН. – 1969. – Т. 99; вып. 2. – С. 347–352.
3. Карно, С. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту сил / С. Карно // Второе начало термодинамики. – М.-Л.: ГТТИ, 1934.
4. Бриллюэн, Л. Термодинамика, статистика и информация / Л. Бриллюэн // УФН. – 1962. – Т. 77; вып. 2. – С. 337–352.
5. Кошманов, В.В. Карно, Клапейрон, Клаузиус / В.В. Кошманов. – М.: Просвещение, 1985. – 95 с.
6. Ерошенко, В.А. Механический эквивалент теплоты. Об «анатомии» и фундаментальности экспериментов Джоуля / В.А. Ерошенко // Исследования по истории физики и механики. – М.: Физматлит, 2011. – С. 199–231.

7. Франкфурт, У.И. Закон сохранения и превращения энергии / У.И. Франкфурт. – М.: Наука. 1978. – 192 с.
8. Biographieet Manuscrits de Sadi Carnot. – Paris, 1927.
9. Кипнис, А.Я. К истории установления уравнения состояния идеального газа / А.Я. Кипнис // Вопросы истории естествознания и техники. – 1962. – Вып. 13. – С. 91–94.
10. Очерки развития основных физических идей /отв. ред. А.Т. Григорьян, Л.С. Поллак. – М.: Наука, 1959. – 512 с.
11. Фрадкин, Л.З. Сади Карно. Его жизнь и творчество / Л.З. Фрадкин. – М.–Л., 1932. – 56 с.
12. Гельфер, Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. Т. 1 / Я.М. Гельфер. – М.: Высшая школа, 1969. – 475 с.
13. Гете, В. Годы странствий Вильгельма Мейстера: собр. соч. / В. Гете. – М.: Худлит., 1975. – Т. 8. – С. 365.
14. Искольдский, И.И. Бенуа Клапейрон / И.И. Искольдский // Успехи химии, 1945. – Т. 14; вып. 4. – С. 337–338.
15. Соколовский, Е. Пятидесятилетие Института и Корпуса инженеров путей сообщения / Е. Соколовский. – СПб., 1859. – 196 с.
16. Clapeyron, E. Über die Bewegende Kraft der Wärme / E. Clapeyron. – Pogg. Annalen, 1843. – Bd. 59. – S. 446.
17. Mémoire on the motive power of Heat // Scientific Mémoire, selected from the Transactions of Foreign Academies. – London, 1847. – Vol. I. – P. 348–376.
18. Дорфман, Я.Г. Всемирная история физики: с начала XIX до середины XX вв. / Я.Г. Дорфман. – М.: Издательство ЛКИ, 2011. – 320 с.
19. Кудрявцев, П.С. Курс истории физики / П.С. Кудрявцев. – М.: Просвещение, 1982. – 448 с.

References

1. Brodyanskii V.M. *Sadi Karno – osnovatel termodinamiki* (Sadi Carnot is founder of Thermodynamic), Moscow, Fizmatlit, 2004, 184 p.
2. Spasskii B.I., Sarangov Z.S. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1969, vol. 99, no. 2, pp. 347–352.
3. Karno S. *Razmyshlenia o dvizhushei sile ognia i o mashinah sposobnyh razvivat etu sily* (Reflections on the driving force of fire and on machines capable of development this power), Moscow, Saint Petersburg, 1934.
4. Briluen L. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1962, vol. 77, no. 2, pp. 337–352.
5. Koshmanov V.V. *Karno, Klapeyron, Klauzius* (Carnot, Klapeyron, Klauzius), Moscow, Prosvezhenie, 1985, 95 p.
6. *Issledovania po isnorii fiziki I mekhaniki* (Research in the history of physics and mechanics), Moscow, Fizmatlit, 2011, pp. 199–231.
7. Frankfurt U.I. *Zakon sohranenia I prevrazhenia energii* (Law of conservation and transformation of energy), Moscow, Nauka, 1978, 192 p.
8. Biographieet Manuscrits de Sadi Carnot, Paris, 1927.
9. Kipnis A. Y. *Voprosy istorii estestvoznania i tekhniki*, 1962, vol. 13, pp. 91–94.

10. *Ocherki razvitiya osnovnykh fizicheskikh idei* (Essays on the development of basic physical ideas), Moscow, Nauka, 1959, 512 p.
11. Fradkin L.Z. *Sadi Karno. Ego zhizn i tvorchestvo* (Sadi Carnot. His life and creation), Moscow, Saint Petersburg, 1932, 56 p.
12. Gelfer Y.M. *Istoria i metodilgia termodynamiki i statisticheskoi fiziki* (History and methodology of thermodynamic and statistical physics), Moscow, Vyshaia shkola, 1969, 459 p.
13. Gete V. *Gody stranstvii Vil'gel'ma Mejstera* (Years of wanderings of Wilhelm Meister), Moscow, Hudlit, 1975, vol. 8, p. 365.
14. Iskoldskii I.I. *Uspehi himii*, 1945, vol. 14, no. 4, pp. 337–338.
15. Sokolovskii E. *Pyatidesyatiletie Instituta i korpusa ingenerov putei soobzhenia* (Fiftieth anniversary of the institute and the corps of railway engineers), Saint Petersburg, 1859, 196 p.
16. Clapeyron E. Über die Bewegende Kraft der Wärme, Pogg. Annalen, 1843, bd. 59, s. 446.
17. Mémoire on the motive power of Heat. Scientific Mémoire, selected from the Transactions of Foreign Academies, London, 1847, vol. I, pp. 348–376.
18. Dorfman Y.G. *Vsemirnaia istoria fiziki* (World history of physics), Moscow, LKI, 2011, 320 p.
19. Kudryavzhev P.S. *Kurs istorii fiziki* (History of physics course), Moscow, Prosvezhenie, 1982, 448 p.