

Réflexions sur la theorem Carnot. (Размышления о теореме Карно.)

Петр Иванович Дубровский, инженер.
Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: d-pi@yandex.ru

В статье математически грамотно и элегантно доказывается абсурдность так называемой теоремы Карно, одного из краеугольных камней в фундаменте современной термодинамики. На элегантность доказательства у меня ушло ни много, ни мало – около двух лет. Затрагиваются некоторые аспекты преподавания термодинамики в школах и вузах и пропаганды научных знаний.

*Бесконечны лишь Вселенная и глупость человеческая,
при этом относительно бесконечности первой из них
у меня имеются сомнения.*

Альберт Эйнштейн.

Изучая как-то книгу члена Королевской Академии наук в Париже, профессора математики коллежа Мазарини Пьера Вариньона «Новые предположения о весе» [M. Varignon «Nouvelles conjectures sur la pesanteur». Paris, 1690.], я наткнулся на следующую фразу: «Mais on s'aperçoit bientôt, que les choses qui nous paroissent les plus simples & les plus aisées à concevoir, quand on ne les regarde qu'en gros & superficiellement, paroissent tres-difficiles & tres-composées, dès qu'on veut les approfondir & les examiner en détail.»

Вот мой перевод: «Но вскоре мы понимаем, что вещи, которые представлялись нам очень простыми и очень легкими для понимания, когда мы смотрим на них в целом и поверхностно, представляются весьма трудными, весьма сложными, как только мы хотим более детально вникнуть в их суть.»

Одной такой очень простой и очень легкой для понимания представляется нам псевдонаучная «умность», в которую человечество свято верит по сей день: «термический КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и является функцией только абсолютных температур нагревателя (T_1) и холодильника (T_2):

$$\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad [1]$$

Цитирую по неоднократно переиздаваемому в СССР и России «Справочнику по физике для инженеров и студентов вузов» Б.М. Яворского и А.А. Детлафа. Эта «умность» называется теоремой Карно и, как принято считать, существует четкое и логичное доказательство этой теоремы. Давайте же вместе, шаг за шагом, попробуем более детально вникнуть в суть этой «умности»?

Сразу прошу прощения у потенциальных читателей, что статья получилась весьма длинной – но что поделать? Ведь не каждый день доводится опровергать теорему, которую так или иначе независимо друг от друга публично «доказали» в своих книгах минимум три лауреата Нобелевской премии по физике:

1. Энрико Ферми, лауреат Нобелевской премии по физике 1938 года, в своей монографии «Термодинамика» - *THERMODYNAMICS BY ENRICO FERMI, Professor of Physics the University of Rome, Italy, NEW YORK, PRENTICE-HALL, INC. 1937.* В СССР она выходила в издательстве Харьковского университета в переводе кандидата технических наук Б.А. Вайсмана. Первое издание в СССР – в 1969 году, второе – в 1973.

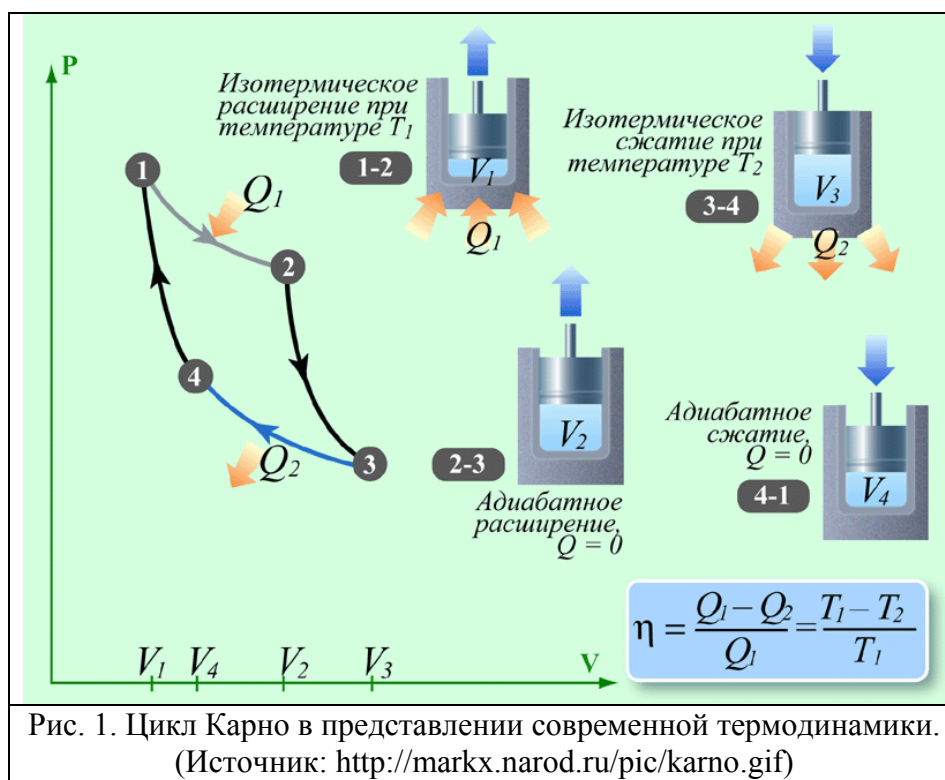
2. Ричард Филлипс Фейнман, лауреат Нобелевской премии по физике 1965 года, который в соавторстве с Робертом Лейтоном и Мэтью Сэндзом написал в 60-ых годах прошлого века, по просьбе американской Академии наук (NAS) «Фейнмановские лекции по физике», которые и по сей день считаются одним из лучших учебников по общей физике для студентов.

Теорема Карно «доказывается» в книге «Feynman Lectures on Physics. Volume 1. Mainly mechanics, radiation, and heats». В русском переводе – Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. «Фейнмановские лекции по физике. Том 4: Кинетика. Теплота. Звук.»

3. Лев Давидович Ландау, лауреат Нобелевской премии по физике 1962 года. Его «доказательство» теоремы Карно есть, в частности, в «Курсе общей физики. Механика и молекулярная физика», написанной в соавторстве с А.И. Ахиезером и Е.М. Лифшицем. Правда, среди физиков бытует убеждение, что во всех книгах, подписанных Л.Д. Ландау и Е.М. Лившицем, «нет ни одной идеи Лившица и ни одной строчки, написанной Ландау». Но, так или иначе, Л.Д. Ландау числится среди авторов указанного «Курса...».

И это не считая бесчисленного множества «доказательств» теоремы Карно в школьных учебниках и в различных других курсах общей физики для высших учебных заведений (Д.В. Сивухина, И.В. Савельева, А.Н. Матвеева, Б.Б. Кудрявцева, и многих других, в том числе и «импортных» авторов).

Все эти «доказательства», так или иначе, построены на цикле Карно, поэтому я позволю себе напомнить, как этот цикл представляется современной термодинамикой (см. рис 1.)



Немного истории. В 1824 году, сын опального наполеоновского министра, отставной военный инженер Николя Леонар Сади Карно путем «мысленного эксперимента» и, как ему казалось, неопровержимой логики, пришел, цитирую [2, перевод]: «к следующему общему выводу: *Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми, в конечном счете, производится перенос теплорода.*»

Логика рассуждений Карно была такова: «...можно с достаточным основанием сравнить движущую силу тепла с силой падающей воды: обе имеют максимум, который нельзя превзойти, какая бы ни была бы в одном случае машина для использования действия воды, и в другом - вещество, употребленное для развития силы тепла.

Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды; движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать и что мы на самом деле и будем называть высотой его падения, – т.е. от разности температур тел, между которыми происходит обмен теплорода. При падении воды движущая сила строго пропорциональна разности уровней в верхнем и нижнем резервуаре. При падении теплорода движущая сила без сомнения возрастает с разностью температур между горячим и холодным телами...».

За период, прошедший со времен Карно, много воды утекло и «много упало теплорода», но, как ни странно, и сама теорема Карно, и суть ее «доказательств» мало изменились. И это – несмотря на то, что человечество отказалось от теории теплорода в пользу также не лишенной существенных недостатков молекулярно-кинетической теории газов. Как старинные, так и современные «доказательства» теоремы Карно, несмотря на некоторые несущественные различия, сводятся к следующему.

Как известно, КПД любого двигателя η равно отношению полезной работы, выполненной этим двигателем A к затраченной энергии W :

$$\eta = \frac{A}{W}. \quad [2]$$

A максимально возможная полезная работа, совершаемая тепловым двигателем, якобы равна разнице количества теплоты, полученной рабочим телом от «нагревателя» Q_1 и переданной этим рабочим телом «холодильнику» Q_2 .

$$A_{\max} = Q_1 - Q_2.$$

Чтобы «не ошибиться со знаками», хитрые физики в последнее время очень часто стали использовать следующую запись (например, так делают в школьных учебниках):

$$A_{\max} = Q_1 - |Q_2|. \quad [3]$$

Чтобышний раз убедиться в этом, я два года назад специально приобрел 3 наиболее «свежих» школьных учебника по физике. Вот эти учебники:

Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. Физика. Учебник для 10 класса общеобразовательных учреждений. Под редакцией проф. В.И. Николаева и проф. Н.А. Парфентьевой. Рекомендован Министерством образования и науки Российской Федерации. 17-е издание, переработанное и дополненное. Москва, «Просвещение», 2008. - формула (13.17) на странице 233.

В.А. Касьянов. Физика. 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации. 7-е издание, доработанное. Москва, «Дрофа», 2005. - формула на странице 277.

С.В. Громов. Физика. Оптика, тепловые явления, строение и свойства вещества. Учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений. Под редакцией Н.В. Шароновой. Допущено Министерством образования Российской Федерации. 6-е издание. Москва, «Просвещение», 2005. - формула в тексте (не выделенная в отдельной строке) на странице 132.

Подставляя в уравнение [2] формулу [3] получим, что

$$\eta_{\max} = \frac{A_{\max}}{W} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad [4]$$

так как якобы количество затраченной энергии равно количеству переданной рабочему телу теплоты $W = Q_1$.

Далее в школьных учебниках обычно следует абсолютно бездоказательный вывод о том, что максимально возможный КПД (коэффициент полезного действия, η_{\max}) теплового двигателя равен:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ где}$$

T_1 – температура «нагревателя» («*foyer*») – термин самого Карно, более верный перевод – «печь», «очаг» или «топка»), или, как принято говорить сегодня в более «продвинутой» научной и учебной литературе, «теплового резервуара с высокой температурой»,

T_2 – температура «холодильника» («*réfrigérant*»), или, по-умному, «теплового резервуара с низкой температурой».

Например, у В.А. Касьянова «доказательство» сводится к тому, что, цитирую: «используя соотношение [4], можно найти максимальное значение КПД тепловых двигателей, соответствующее циклу Карно»:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

У С.В. Громова: «Карно установил, что КПД этого цикла η_{\max} определяется лишь температурами нагревателя и холодильника и не зависит от устройства двигателя и природы используемого в нем рабочего тела. Однако формулу этого КПД впервые сумел получить лишь Клаузиус. Оказалось, что

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad [5]$$

Вывод сводится к тому, что

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1) \quad [6]$$

$$Q_2 = T_2(S_1 - S_2), \text{ где} \quad [7]$$

T_1 и T_2 – температура соответственно нагревателя и холодильника, а

S_1 и S_2 – энтропия, надо полагать, рабочего тела, изменяющаяся во время двух изотермических процессов цикла Карно.

Подставляя эти значения Q_1 и Q_2 из уравнений [6] и [7] в уравнение [4], мы и получим, в конечном итоге, формулу [1] или [5], что, по сути, одно и то же. Кстати, такое доказательство довольно часто встречается и в вузовских курсах, например, в «Курсе физики» И.В. Савельева.

На мой взгляд, энтропия – абсолютно никчемная категория (если говорить философским языком), абсолютно ненужное для физики понятие, навязанное человечеству немецким физиком Рудольфом Клаузиусом в середине позапрошлого столетия. Абсолютно все тепловые явления можно объяснить, не прибегая к энтропии. Энтропия существует исключительно в «виртуальном пространстве», в мысленных экспериментах. Ее нельзя, что говорится, пощупать, осмотреть, то есть измерить и оценить. Это понятие лишь уводит человечество в сторону от правильного понимания термодинамики.

Разумеется, мое личное мнение об энтропии ни в коей мере не является опровержением теоремы Карно. Только вот и в качестве необходимого и достаточного доказательства теоремы Карно энтропия тоже никак не подходит. Давно известно, что единственно надежным доказательством любой гипотезы, является «опыт, сын ошибок трудных». Особенно в области физики. А когда одна, родившаяся в результате мысленного эксперимента Сади Карно теорема подтверждается лишь другим мысленным экспериментом Рудольфа Клаузиуса и «уходящим в себя» виртуальным физическим понятием (энтропией), то вряд ли такое подтверждение можно считать достаточным доказательством. Поэтому доказательство теоремы Карно через энтропию нельзя считать легитимным.

У Г.Я. Мякишева, Б.Б. Буховцева, и Н.Н. Сотского просто констатируется факт:
 «Карно (заметьте, Карно, а не Клаузиус, как у С.В. Громова) получил для КПД своей машины следующее выражение:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Как и следовало ожидать, КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника». Это вообще просто шедевр человеческой мысли. Кто может объяснить мне, почему, на каком основании, следовало ожидать именно такого вывода?

В «более продвинутой» современной учебной литературе по курсу физики часто указывается, что этот самый η_{\max} вовсе не обычный КПД обычного теплового двигателя, а некий «термический» или «термодинамический» КПД, присущий исключительно идеальному теплому двигателю Карно. Но в школьных учебниках и школьных программах этим тонкостям не придают абсолютно никакого значения.

На самом деле неважно, как называть η_{\max} : термическим КПД, термодинамическим КПД или просто КПД теплового двигателя. Дело в том, что основа любого доказательства теоремы Карно, формула [3], $A_{\max} = Q_1 - |Q_2|$, неверна. И я готов доказать это, несмотря на то, что зачастую в учебниках и вузовских курсах общей физики эта формула [3] «подкрепляется» соответствующими рисунками (см. рис. 2). Эти рисунки придают «солидности» этой формуле, и практически ни у кого не возникает никаких сомнений в её достоверности:

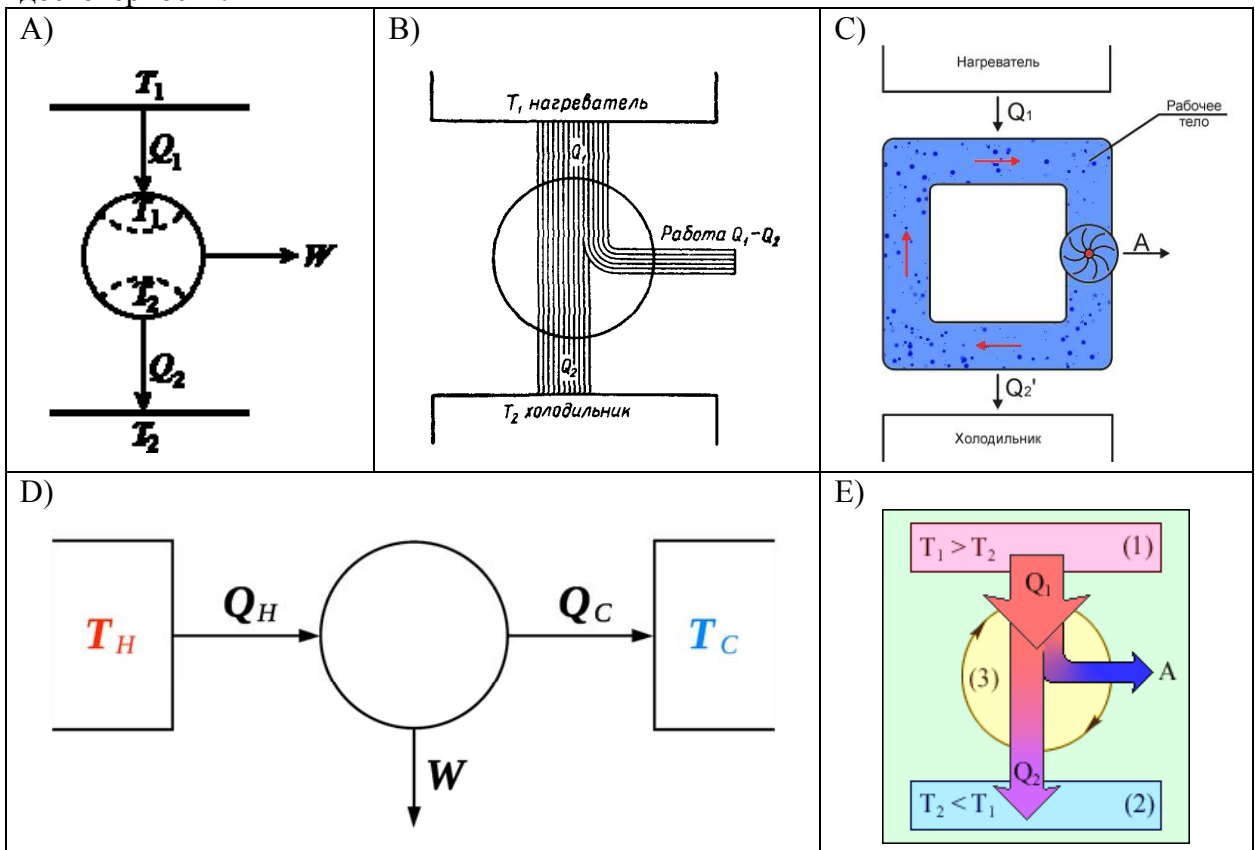


Рис. 2. Работа тепловой машины. Рисунки из разных источников:

- A). Р. Хейвуд. Термодинамика равновесных процессов.
- В). Б.Б. Кудрявцев Курс физики. Теплота и молекулярная физика. Рис. 98 на стр. 204
- С). К.В. Глаголев, А.Н. Морозов. Физическая термодинамика. (Так учат на кафедре физики МГТУ им. Баумана)
- Д). Из Википедии. [http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot's_theorem_\(thermodynamics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot's_theorem_(thermodynamics))
- Е). Откуда-то из необъятных глубин Интернета.

Примечание: W (the Work) – это «суперимпортное» обозначение работы A (das Arbeit).

Но! Давайте зададимся одним вопросом. Почему в уравнении [3] количество теплоты, переданное от рабочего тела «холодильнику», взято по модулю? На самом деле такая запись – бестолковость чистой воды. Дело в том, что и Q_1 и Q_2 – это не просто «теплота». Это – **количество** теплоты. А **количество не может быть отрицательным**. Ведь если у Вас дома в вазе для фруктов лежат, дожидаясь, пока их съедят, два яблока – то Вы и скажете: - «У меня есть два яблока». И даже если Вы должны кому-то сто рублей, Вы никогда не скажете: – «У меня есть минус сто рублей». А скажете: - «Я должен такому-то человеку сто рублей». Почему? Потому что количество – это всегда и везде положительное число. Даже в физике. Вернее сказать, тем более – в физике.

Взятая по модулю величина Q_2 подразумевает, что количество теплоты, переданное от рабочего тела «холодильнику» может быть отрицательным. Как же так? А виновата в этом наша научная система, которая, несмотря на это, пожалуй, до сих пор остается лучшей на сегодняшний день в мире. Кто, как и чему учит в других странах, чтобы было с чем сравнить нашу научную школу, я продемонстрирую в конце статьи. Но и наша научная школа – не есть верх совершенства. Во всяком случае, в области физики. Дело в том, что у нас высшая школа готовит не физиков, а физико-математиков. У нас в стране нет докторов и кандидатов физических наук. Есть доктора и кандидаты **физико-математических** наук. А излишнее, на мой взгляд, увлечение математикой, не дает физикам под правильным углом посмотреть на чисто физические проблемы. За красивыми математическими формулами и выкладками физико-математики зачастую теряют суть вопросов, которые обязаны решать физики, забывая истинный смысл физических явлений.

Так и в данном случае. Количество теплоты не может быть отрицательным, вне зависимости от того, от тела A теплота (или тепловая энергия) передается телу B или наоборот. Более того, напомним, что направление передачи теплоты всегда идет от более горячего тела – более холодному. И никогда – наоборот. Как же специалисты в области физико-математики в таких условиях умудряются отличить «положительную» теплоту от «отрицательной»? А я еще напомним про то, что при одинаковой температуре двух тел никакой передачи тепловой энергии (теплоты) от одного тела другому не происходит. Это я говорю всем физикам-теоретикам и физико-математикам как грамотный в техническом отношении инженер. Дело в том, что именно так устроен наш мир. Мир, в котором мы живем. Если бы это было не так и была бы возможна передача тепловой энергии между телами с одинаковой температурой, в любом соседнем супермаркете можно бы было купить десяток вечных двигателей второго рода по цене 50 копеек пучок, а нищие и голодные российские нефтяные и газовые олигархи сидели бы возле несметных запасов никому не нужных углеводов.

Насколько я знаю, поиски физиками демона Максвелла, теоретически способного обеспечить создание вечного двигателя второго рода, тоже пока успехом не увенчались. От себя добавлю, что и вряд ли когда-нибудь увенчаются. Пока что единственными, кто сумел обнаружить и приспособить демон Максвелла для полезной работы, были фантасты (не физики) братья Стругацкие, у которых бедный демон открывал и закрывал входные двери института НИИЧАВО. Видно, даже в мире фантастики он оказался не годен ни на что большее.

А теперь повнимательнее посмотрим на рис. 2. Забавно, но на рисунке из «Термодинамики равновесных процессов» Р. Хейвуда (рис. 2 А) видно, что некое количество теплоты перетекает от «нагревателя» с температурой T_1 , (который, между прочим, в соответствии с мысленным экспериментом Сади Карно вовсе не нагревает, а лишь поддерживает определенную температуру) рабочему телу с **той же самой температурой T_1** , чего в принципе, даже теоретически, не может быть никогда. Нам попросту демонстрируют проект вечного двигателя второго рода. И это несмотря на то, что французская Королевская Академия наук в Париже еще с 1775 года перестала принимать заявки на патенты конструкций вечных двигателей. Как же так? Для себя отметим, что на всех остальных рисунках (рис. 2 В, С, D, E.) эта пикантная подробность –

о том, что передача теплоты от «нагревателя» – рабочему телу и затем от рабочего тела – «холодильнику», происходит при равенстве температур этих тел – попросту опущена.

Вообще, надо сказать, физико-математики довольно наплевательски относятся ко второму началу термодинамики, которое, например, я, как инженер, ценю и уважаю, и в действительности которого я не раз убеждался на личном опыте, равно как и в действительности трех законов Ньютона. Взять, к примеру, Льва Давидовича Ландау. (Чувствую, как сейчас на меня спустят всех собак. А как же, покусились на святое.) Вот что написано в «Статистической физике»:

«Процесс этот должен осуществляться таким образом, чтобы тела, между которыми происходит непосредственный обмен энергией, находились при одинаковой температуре. Именно, рабочее тело при температуре T_2 приводится в соприкосновение с телом с температурой T_2 и изотермически получает от него определенную энергию. Затем оно адиабатически охлаждается до температуры T_1 , отдает при этой температуре энергию телу с температурой T_1 , и, наконец, адиабатически возвращается в первоначальное состояние. При расширениях, связанных с этим процессом, рабочее тело производит работу над внешними объектами. Описанный круговой процесс называется циклом Карно.»

Авторитет Л.Д. Ландау в мире теоретической физики настолько велик, что любое подписанное им слово воспринимается как истина в последней инстанции и не может быть подвергнуто никакой критике. А на самом деле? «...Рабочее тело при температуре T_2 приводится в соприкосновение с телом с температурой T_2 и изотермически получает от него определенную энергию». «Определенную энергию» – надо понимать, тепловую энергию? Другого ведь не дано. Между тем и наш опыт, и второе начало термодинамики гласит о том, что передача теплоты («определенной энергии») между телами возможна лишь в случае, если имеет место **разность температур**.

Более-менее дельное и, на первый взгляд, логичное «доказательство» теоремы Карно можно найти в книге профессора Оксфордского университета Д. тер Хаара и профессора Норвежского технологического института Г. Вергеланда «Элементарная термодинамика». Надо сказать, что аналогичный алгоритм «доказательства» используется и в «Общей физике» Б.Б. Кудрявцева за 1965 год, и в «Фейнмановских лекциях по физике». Приводить ход рассуждений из «Фейнмановских лекций...» я не стал, несмотря на то, что сначала хотел отталкиваться именно от них. Дело в том, что хотя §4 главы 44 в этих лекциях и называется «Коэффициент полезного действия идеальной машины», и логика «доказательств» аналогична логике Д. тер Хаара и Г. Вергеланда, только вот про КПД идеальной машины в этой главе – ни одного слова. И, самое главное – сама формула определения КПД ([1]) – отсутствует. То есть вывод теоремы Карно – есть, а самого главного – формулы – нет. Что поделать... Творческие люди, они такие... Через пару страниц забыли, о чем именно хотели рассказать... Поэтому я и решил воспользоваться другим, вполне завершенным «импортным» «доказательством», которое и привожу здесь:

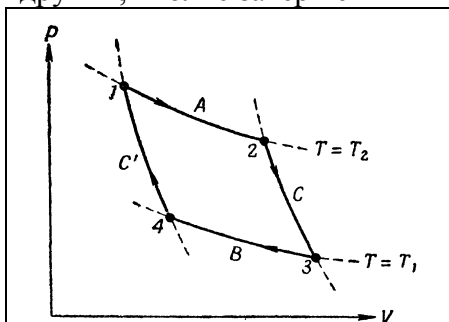


Рис. 3. Цикл Карно по Д. тер Хаару и Г. Вергеланду.

«Процесс А. (см. рис. 3). Поскольку газ идеальный, $(dU/dV)T = 0$ и внутренняя энергия остается постоянной. Все тепло, полученное от резервуара при температуре T_2 , превращается во внешнюю работу

$$Q_2 = \int_1^2 p dV = RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad [8]$$

Процесс В. Подобным же образом, работа, совершенная при сжатии, превращается в тепло, которое передается холодному резервуару

$$Q_1 = \int_3^4 p dV = RT_1 \ln \frac{V_4}{V_3}. \quad [9]$$

Процессы С и С'. Поскольку газ идеальный и U зависит только от температуры T , из уравнения $Q = U_2 - U_1 + L$ следует, что работа, совершаемая в одном из этих двух

адиабатических процессов, полностью компенсирует работу, совершаемую в другом процессе. Действительно, пользуясь адиабатическим условием $C_V dT + p dV = 0$, получаем

$$C_V (T_2 - T_1) = \int_2^3 p dV = - \int_4^1 p dV .$$

Чтобы найти связь между V_1 , V_2 , V_3 и V_4 , заметим, что, согласно уравнению Пуассона $TV^{R/C_V} = \text{const}$, в адиабатических процессах:

$$(2 \rightarrow 3) \quad T_2 V_2^{\chi-1} = T_1 V_3^{\chi-1}$$

$$(4 \rightarrow 1) \quad T_1 V_4^{\chi-1} = T_2 V_1^{\chi-1}$$

и, следовательно,

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

Подставляя это соотношение в уравнения [8] и [9], получаем

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

В то же время мы приходим к результату... что КПД оптимального цикла равен

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} . \gg$$

Что и требовалось доказать.

Наблюдательный читатель, наверно, обратил внимание, что в этой книге T_1 – это температура «холодильника», а T_2 – температура «нагревателя», то есть наоборот, чем принято в России. Разумеется, никакой принципиальной роли это при доказательстве не играет. Важно, что в этом доказательстве фигурирует так называемая **универсальная газовая постоянная R** , известная большинству читателей по так называемому уравнению Менделеева-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT . \quad [10]$$

Физический смысл универсальной газовой постоянной заключается в том, что она численно равна работе расширения одного моля **идеального одноатомного газа** при изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К.

То есть, касаясь вопроса о применении универсальной газовой постоянной в «доказательстве» теоремы Карно, мы наблюдаем явную подтасовку, явную подмену понятий. «Универсальная» – вроде как означает, что эта постоянная универсальна для всех газов. Ан нет. Она справедлива, как следует из ее физического смысла, только для **идеального**, причем только **одноатомного газа!** Аналогичная величина для реальных газов вовсе не постоянна. Мало того, что аналогичная величина, численно равная работе расширения одного моля газа при изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К, для каждого реального газа своя, так она еще имеет наглость меняться в зависимости от температуры и давления. Это я говорю, как инженер-практик, а не как физик-теоретик, так что можете мне поверить.

«Газовая» – означает, что она может быть использована исключительно для газов. И никоим образом не для жидкостей. Тогда почему в «лекциях...» нобелевского лауреата Р. Фейнмана вдруг обнаруживаются такие перлы:

«Займемся идеальной машиной, в которой обратимы все процессы. Чтобы показать, что создание такой машины в принципе возможно, мы просто приведем пример рабочего цикла, причем нас не интересует возможность его практической реализации, достаточно того, что с точки зрения Карно он обратим. Предположим, что в цилиндре, оборудованном поршнем без трения, имеется газ. Это не обязательно идеальный газ. Содержимое цилиндра вообще не обязано быть газом. Но для определенности будем считать, что в цилиндре идеальный газ.»

Лично мне, в отличие Р. Фейнмана, Р. Лейтона и М. Сэндза, для доказательства теоремы Карно недостаточно того, что цикл Карно с точки зрения самого Сади Карно обратим. Меня, как инженера, как раз больше бы убедила именно возможность практической реализации этого цикла и сравнение полученных при этом опытных данных о количествах передаваемой теплоты и величине выполненной полезной работы с теоретическими формулами.

А строки, выделенные мной жирным курсивом... Уж простите меня, добрые люди, но это больше похоже на бред, чем на доказательство. Если в цилиндре идеального теплового двигателя находится не *газ*, а *жидкость*, то любой «доказыватель теоремы Карно», несмотря на наличие у него Нобелевской премии по физике или звания доктора физико-математических наук, не имеет права пользоваться при доказательстве ни изотермами, ни изохорами, ни изобарами, ни адиабатами, ни «газовыми» законами Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, ни уравнением Менделеева-Клапейрона. А универсальную газовую постоянную* «доказыватель» имеет право использовать только тогда, когда он предварительно посчитает «для определенности ... что в цилиндре – идеальный газ». И это «доказательство» будет доказательством только лишь для частного случая – когда в идеальном тепловом двигателе в качестве рабочего тела используется идеальный газ. И никак иначе. Есть такая наука – логика, знаете ли.

Использование при «доказательстве» универсальной и всеобъемлющей теоремы Карно универсальной газовой постоянной, то есть постоянной Менделеева, нарушает основы элементарной логики. Так как полученный для частного случая вывод не может являться и не является доказательством универсальной теоремы. Поэтому даже если бы «доказательство» теоремы Карно было верным, то действие этой теоремы распространялось бы исключительно на идеальные тепловые двигатели, использующие в качестве рабочего тела идеальный газ, которого, как известно, в природе не существует. Правда, следует отметить, что в качестве идеального газа можно использовать **He**, гелий, как наиболее близкий к виртуальному **Gi** (от фр. *Gaz ideale*, я решил присвоить идеальному газу свое обозначение, по аналогии с периодической системой элементов, а аббревиатура **Gp** - *Gaz parfait*, мне почему-то решительно не понравилась, хотя она и более правильная с точки зрения французов).

***Примечание:**

Кстати, «универсальную газовую постоянную» в некоторых научных кругах называют «постоянная Менделеева». И, пожалуй, это – более подходящее название для данной величины. Потому что такое название не будет вызывать у учащихся формирования неправильного устойчивого стереотипа постоянности и универсальности при определении *величины работы одного моля газа при расширении*. Хотя, как мне кажется, историческая справедливость заключается в том, чтобы назвать эту величину «постоянной Менделеева-Клапейрона». Дело в том, что именно Бенуа Поль Эмиль Клапейрон, бывший профессор Института Корпуса инженеров путей сообщения в Санкт-Петербурге, еще в 1834 году (то есть в год рождения Дмитрия Ивановича Менделеева) в своей статье, «*MÉMOIRE sur la puissance motrice de la chaleur; par M. E. CLAPEYRON, Ingénieur des Mines*», опубликованной в «*Journal de l'École Royale Polytechnique, tome XIV*», вывел следующую формулу:

$$pv = \frac{P_0 V_0}{267 + t_0} (267 + t), \text{ откуда}$$
$$pv = R(267 + t).$$

Если понимать, что величина $(267+t)$ – это и есть абсолютная температура (в те времена абсолютный ноль был определен в -267°C , в настоящее время, как известно, она определяется как $(273,15+t)$), и сравнить его с уравнением [10], то следует признать, что Менделеев лишь немного «доработал» уравнение Клапейрона.

Надеюсь, я наглядно продемонстрировал, что во всех «доказательствах» теоремы Карно, «которые представлялись нам очень простыми и очень легкими для понимания», и которые можно условно подразделить на две группы:

- 1) через виртуальную физическую категорию «энтропию», и
- 2) посредством «универсальной газовой постоянной», на поверку оказавшейся газовой, но не совсем постоянной и вовсе не универсальной,

имеются определенные «нюансы», и имеет смысл более детально вникнуть в их суть этих «доказательств».

Во многих «доказательствах» грамотный читатель, при желании, может и сам обнаружить различные ошибки, если конечно, захочет их найти и проявит определенную внимательность и настойчивость. Таких ошибок пруд пруди. Например, в уже упомянутом §4 главы 44 «Фейнмановских лекций...» есть такие строки:

«... **полная работа газа в период расширения**

$$W = \int_a^b p dV$$

совершается за счет энергии Q_1 , полученной от резервуара.» (Через W здесь обозначена работа, а не энергия – книга американская.)

Вовсе нет. **Полная** работа газа в цикле Карно в период расширения совершается в большей степени за счет энергии, накопленной в процессе сжатия газа. И лишь частично работа выполняется за счет полученной от «нагревателя» теплоты.

Но самое удивительное во всех «доказательствах» теоремы Карно заключается не в этом. А в том, что, как я уже говорил, основная посылка, лежащая в основе любого «доказательства» теоремы Карно – и через энтропию, и через постоянную Менделеева, я имею в виду уравнение [3], неверна. Продублирую это неверное уравнение:

$$A_{\max} = Q_1 - |Q_2|.$$

Посредством ошибочных рассуждений при мысленном эксперименте можно «доказать» что угодно. Так, например, существует целый ряд забавных алгебраических «доказательств» того, что $2 \times 2 = 5$. Одно из них приводится в книге Я.И. Перельмана «Занимательная алгебра». Вот оно:

«Напишем не вызывающее сомнений равенство:

$$16 - 36 = 25 - 45$$

Прибавим к каждой части уравнения по $20\frac{1}{4}$:

$$16 - 36 + 20\frac{1}{4} = 25 - 45 + 20\frac{1}{4}$$

Преобразуем это выражение:

$$4^2 - 2 \cdot 4 \cdot \frac{9}{2} + \left(\frac{9}{2}\right)^2 = 5^2 - 2 \cdot 5 \cdot \frac{9}{2} + \left(\frac{9}{2}\right)^2$$

Отсюда:

$$\left(4 - \frac{9}{2}\right)^2 = \left(5 - \frac{9}{2}\right)^2$$

Следовательно,

$$4 - \frac{9}{2} = 5 - \frac{9}{2}$$

Прибавим к каждой части уравнения по $\frac{9}{2}$ и получим, что $4 = 5$, а значит,

$$2 \times 2 = 5$$

что и требовалось доказать.»

Полагаю, людям, хорошо знающим и понимающим алгебру, не надо объяснять, где именно заложен подвох в этом «доказательстве». Менее продвинутым в этом вопросе, тем более тем, кто впервые видит это «доказательство» вероятнее всего, придется немного поломать голову, чтобы разобраться, в чем тут дело. А дело в том, что из уравнения $\left(4 - \frac{9}{2}\right)^2 = \left(5 - \frac{9}{2}\right)^2$ вовсе не следует, что $4 - \frac{9}{2} = 5 - \frac{9}{2}$. Надеюсь, не надо объяснять, почему?

Неумолимая логика говорит о том, что если нам удастся доказать, что если для какого-то одного-единственного частного случая цикла Карно $A_{\max} \neq Q_1 - |Q_2|$, это будет достаточным основанием для опровержения теоремы Карно. Можно будет смело утверждать, что все без исключения «доказательства» теоремы Карно – это «доказательства» примерно такого же пошиба, как и приведенное мной выше «неоспоримое доказательство» $2 \times 2 = 5$, и, следовательно, служат лишь одной цели – профанации науки.

Кстати, некоторые особо «продвинутые» физики, например, К.В. Глаголев, А.Н. Морозов в своем учебнике «Физическая термодинамика» уже всю доказывают «первую и вторую теоремы Карно». «Доказательства» «первой и второй теорем Карно» можно найти и в книге И.П. Базарова «Термодинамика». Тут нам хотя бы с одной теоремой Карно разобраться как следует. Ну что, уважаемый читатель, готовы разбираться?

Тогда – вперед.

«Копая» столь серьезные, фундаментальные темы, как цикл Карно и КПД тепловой машины, лучше всего начинать от ее истоков. Фундаментальные – потому, что на них, как на фундаменте построено все здание современной термодинамики, которое во многом формирует и наше мировоззрение. Так что «плясать», как говорится, будем «от печки» – от трактата «*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*», «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», написанного Сади Карно и впервые опубликованного в Париже в 1824 году. После слов «от печки» так и просится на язык какой-нибудь каламбур насчет того, что именно «от печки» – от топки бойлера в паровых машинах шахтерского капитана Томаса Сэвери, торговца скобяными изделиями Томаса Ньюкомена, отца «гражданской инженерии» Джона Смитона и мастера по изготовлению точных измерительных приборов Джеймса Уатта и надо плясать. Но для уменьшения объема статьи я решительно вычеркнул из нее все, что изучил и написал по этому поводу за последние два года. А написал, поверьте, не так уж и мало. Надеюсь когда-нибудь опубликовать в будущем.

Что послужило толчком для написания «Размышлений о движущей силе огня ...», нетрудно догадаться. Менее чем 9 лет тому назад Франция потерпела окончательное поражение в продолжительной, более чем 20-летней войне против антифранцузской коалиции, во главе которой выступала постоянная соперница и заклятый враг Франции – Великобритания.

Вот что пишет Сади Карно. Текст приведен по изданию «*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance, par S. Carnot, ancien élève de l'École Polytechnique*», Paris, Gautier-Villars, Imprimeur-Libraire, 1878. Перевод на русский язык – это, если можно так выразиться, «канонический» перевод, сделанный еще в начале XX века В.Р. Бурсианом и Ю.А. Крутковым.

«Le service le plus signalé que là machine à feu ait rendu à l'Angleterre est, sans contredit, d'avoir ranimé l'exploitation de ses mines de houille, devenue languissante et qui menaçait de s'éteindre entièrement à cause de la difficulté toujours croissante des épuisements et de l'extraction du combustible. On doit mettre sur le second rang les services rendus à la fabrication du fer, tant par la houille, offerte avec abondance et

substituée aux bois au moment où ceux-ci commençaient à s'épuiser, que par les machines puissantes de toutes espèces dont l'emploi de la machine à feu a permis ou facilité l'usage.

Наибольшая услуга, оказанная тепловой машиной Англии, есть, несомненно, возрождение деятельности угольных копий, грозивших совсем заглохнуть вследствие все возрастающей трудности откачивать воду и подымать уголь. Во вторую очередь надо поставить услугу, оказанную производству железа как благодаря широкой замене дров углем как раз в тот момент, когда естественные запасы древесного топлива приходили к концу, так и благодаря машинам всякого рода, применение которых позволила или облегчила тепловая машина.

Le fer et le feu sont, comme on le sait, les aliments, les soutiens des arts mécaniques. Il n'existe peut-être pas en Angleterre un établissement d'industrie dont l'existence ne soit fondée sur l'usage de ces agents et qui ne les emploie avec profusion. **Enlever aujourd'hui à l'Angleterre ses machines à vapeur, ce serait lui ôter à la fois la houille et le fer; ce serait tarir toutes ses sources de richesse, ruiner tous ses moyens de prospérité; ce serait anéantir cette puissance colossale.** La destruction de sa marine, qu'elle regarde comme son plus ferme appui, lui serait peut-être moins funeste.

Железом и огнем, как известно, питаются и поддерживаются механические производства. В Англии, может быть, нет ни одного промышленного заведения, существование которого не было бы основано на употреблении этих двух агентов в их широком использовании. Отнять у Англии в настоящее время ее паровые машины – означало бы разом отнять у нее железо и уголь, отнять у нее все источники богатства, уничтожить все средства к процветанию, это означало бы уничтожить эту великую мощь. Уничтожение флота, который она считает своей главной опорой, было бы для нее менее гибельным.»

«Можно утверждать, - добавляет Карно, - что в Англии, со времени изобретения тепловых машин, добыча угля удесятирилась. Приблизительно то же имеет место относительно добычи меди, олова и железа. Действие, которое тепловая машина произвела полвека тому назад на копях Англии, ныне повторяется на серебряных и золотых рудниках Нового Света, - рудниках, которые сокращались изо дня в день главным образом, благодаря неудовлетворительному действию машин, откачивающих воду и поднимавших руду.»

По сути, 28-летний военный инженер полагал, что проигрыш Франции в войне обусловлен ее техническим отставанием перед Великобританией. Возможно, он был близок к истине.

Далее в «Размышлениях...» Карно проводит, что сейчас называется, «мысленный эксперимент». В основе этого эксперимента лежат его философские воззрения о мироустройстве, его знания в области физики, которые находились на уровне самой передовой науки того времени и его представления о принципах работы паровых машин. Надо сказать, что Сади Карно получил, пожалуй, наиболее блестящее техническое образование для того времени. Он два года, с 1812 по 1814, «во имя Родины, Науки и Славы» обучался в Политехнической Школе (Девиз Школы – «Pour la Patrie, les Sciences et la Gloire»). Это учебное заведение было основано его отцом, который был не только одной из ярких фигур на политической шахматной доске Франции в те годы, но и ученым (например, он ввел в математику понятие «комплексного числа»), совместно с математиком Гаспаром Монжем. Кстати сказать, профессорами Политехнической Школы в те годы были Жозеф Луи Гей-Люссак и Франсуа Араго. Лекции по химии Карно и его сокурсникам читал Луи Жак Тэнар, по механике – Симеон Дени Пуассон, по физике – Жан Анри Хассенфрац. После чего Сади Карно еще два года обучался в Инженерной Школе в городе Мец. Есть сведения, что после возвращения в Париж в 1819 году, посещал лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, национальной Консерватории искусств и ремёсел.

Свои умозаключения Сади Карно обосновывал в основном не опытом эксплуатации реально действующих в то время паровых двигателей, а результатами

различных экспериментов с газами, которые проводили господа де Лаплас, Гей-Люссак, совместно с Велтэром и Далтоном, Пуассон, Клемэн и Дезорм, Дюлон и Пти, Деларош и Берар. Сегодня мало кто знает, что ко времени обучения Карно прошло менее двух десятилетий, как Антуан Лоран де Лавуазье начал борьбу против распространенной в те времена теории флогистона, предложив взамен теорию теплорода. Между флогистоном и теплородом развернулся нешуточный научный спор, из-за которого в Берлине Лавуазье даже подвергли сожжению *in effigie* (то есть символическому) как еретика науки. Возможно, если бы Лавуазье попался в руки берлинцам, то сожжение могло бы быть и не символическим. Зато некоторые умники много лет спустя, ничтоже сумяшеся, пишут: «Флогистон – то же, что теплород». (Цитата из Толкового словаря Ушакова). Примерно такая же глупость написана и в Большой советской энциклопедии в статье про теплород. Спрашивается, чего ради было копыя ломать в конце XVIII века по этому поводу?

В понимании Лавуазье теплота была материальна и представляла собой некую субстанцию, некий простой газ – невидимый и неразрушимый, газ, не имеющей массы, способный проникать в твердые тела и жидкости и «просачиваться» сквозь них. Этот газ сам Лавуазье называл *fluide igné* то есть «магматический флюид» или «магматический газ». По всей видимости, такого же мнения о теплоте (как о газе – теплороде) придерживался и Сади Карно. Цитирую:

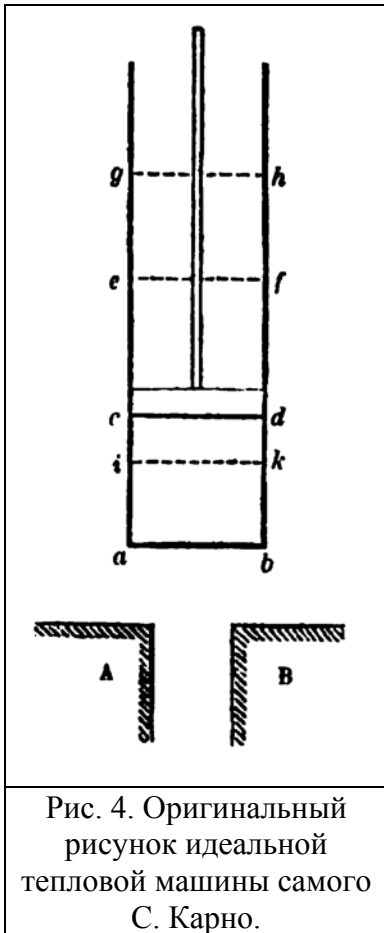
«Получение движения в паровых машинах всегда сопровождается одним обстоятельством, на которое мы должны обратить внимание. Это обстоятельство есть восстановление равновесия теплорода, т.е. переход теплорода от тела, температура которого более или менее высока, к другому, где она ниже. В самом деле, что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

Таким образом, вдруг оказывается, что **вся наша современная термодинамика оказывается в конечном счете выстроена на теории теплорода**, от которой, слава богу, уже более как полтора столетия отказались в пользу тоже далеко не безгрешной молекулярно-кинетической теории.

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

Ознакомившись с этими научными представлениями о природе теплоты и о «сожженном в топке воздухе» и немного представив уровень самой что ни на есть передовой науки того времени, вернемся к теореме и циклу Карно.

Вот как описывал рабочий цикл идеальной, на его взгляд, тепловой машины сам Сади Карно. По сути, эти несколько строк являются своего рода «Манифестом термодинамики», ее краеугольным камнем, базой, фундаментом, основанием всех других теоретических изысканий в этой области физики. Чтобы не допускать различных кривотолков, я буду параллельно приводить описание цикла Карно, как оно было сделано самим автором на французском языке и, так сказать, «канонический» перевод на русский язык, выполненный в начале XX века В.Р. Бурсианом и Ю.А. Крутковым.



«Cette notion préliminaire étant posée, imaginons un **fluide élastique**, de l'air atmosphérique, par exemple, renfermé dans un vaisseau cylindrique **abcd**, muni d'un diaphragme mobile ou piston **cd**; soient en outre les deux corps A, B, entretenus chacun à une température constante, celle de A étant plus élevée que celle de B; figurons-nous maintenant la suite des opérations qui vont être décrites:

...Вообразим **упругую жидкость**, например, атмосферный воздух, заключенный в цилиндрический сосуд **abcd** (рис. 4), закрытый подвижной диафрагмой или поршнем **cd**. Кроме того, предположим два тела A и B, поддерживаемые оба при постоянной температуре, причем A - при более высокой, чем B, затем вообразим следующий ряд операций.

Обратим внимание на перевод. «Un fluide élastique» – это что же, следует понимать, как «упругая жидкость»? Перевод, что и говорить, довольно безграмотный – с точки зрения физики. Дело в том, что слово «un fluide», переводится как есть «**нечто текучее**», как «**вещество, которое может перетекать**» и означает не только «**жидкость**», но и «**газ**».

Неужели Сади Карно считал атмосферный воздух упругой жидкостью (...вообразим **упругую жидкость**, например, атмосферный воздух)? Вряд ли. А после того, как Поль Эмиль Бенуа Клапейрон «привязал» к размышлениям

Карно pV -диаграмму, переводить это слово в контексте описания цикла Карно как «**жидкость**» - это верх безграмотности (при всем уважении к В.Р. Бурсиану и Ю.А. Круткову). «Un fluide» должно переводиться на русский язык исключительно как «**газ**» – и никак иначе.* По той простой причине, что термодинамические процессы,

*Примечание

Но, как ни странно, большинство физиков до сих пор не обращают внимания на подобные тонкости. Смотрим на перевод книги Энрико Ферми, сделанный кандидатом технических наук Б.А. Вайсманом. Читаем: «Рассмотрим **жидкость**, состояние которой можно изобразить на диаграмме (V, P) , [см. рис. 5] а также две **адиабаты** и две **изотермы**, соответствующие температурам t_1 и t_2 ». В английском издании книги Ферми, откуда был сделан перевод, используется слово «**fluid**». Заглянем в Большой англо-русский словарь:

Fluid - 1. сущ. 1) текучая среда (жидкость или газ)...

2. прил. 1) жидкий, текучий (термин, объединяющий жидкие и газообразные вещества)...

А теперь скажите, пожалуйста, люди, которые хоть чуть-чуть понимают, любят и уважают физику, может ли хоть какая-нибудь **жидкость** менять свое состояние в соответствии с **адиабатами** и **изотермами**, изображенными на рис. 5? Конечно же, нет. Не думаю, что Энрико Ферми этого не знал и не понимал. Хотя... Кто знает...

Про то, что в «Фейнмановских лекциях...», при описании цикла Карно, написано что «...содержимое цилиндра вообще не обязано быть газом ...» я уже упоминал. И подобных примеров – и не сосчитаешь, точно так же как и донов Педров в Бразилии, где живет много-много диких обезьян.

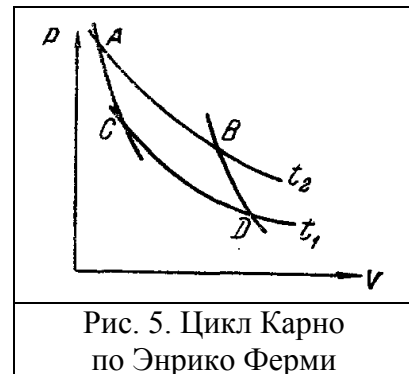


Рис. 5. Цикл Карно по Энрико Ферми

происходящие с рабочим телом внутри идеального теплового двигателя Карно – адиабатные и изотермические расширения и сжатия – могут происходить только с газами. Ни жидкости, ни твердые тела не могут «адиабатно расширяться» или «изотермически сжиматься», так, как газы.

Поэтому, возвращаясь к авторскому описанию цикла Карно, давайте лучше «...вообразим **упругий газ**, например, атмосферный воздух, заключенный в цилиндрический сосуд **abcd** (рис. 4), закрытый подвижной диафрагмой или поршнем **cd**. Кроме того, предположим два тела **A** и **B**, поддерживаемые оба при постоянной температуре, причем **A** - при более высокой, чем **B**, затем вообразим следующий ряд операций.» Одновременно давайте посмотрим на **pV**-диаграмму (см. рис. 6), впервые введенную для описания цикла Карно Эмилем Клапейроном в уже упоминавшейся статье «*Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur*» на которой я указал точки, соответствующие тому или иному пункту описания цикла. Если в пункте описан некий процесс, то начало этого процесса обозначено, например, для пункта 2 – точкой (2), а конец – точкой (2'), для пункта 3 – точкой (3), а конец – точкой (3') и т.д.

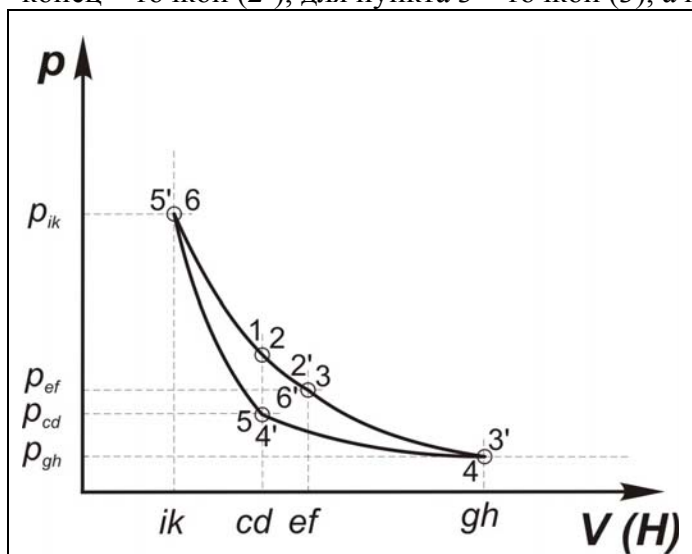


Рис. 6. «Наложение» собственноручного описания цикла Карно на **pV**-диаграмму из двух изотерм и двух адиабат.

«1° Contact du corps **A** avec l'air renfermé dans la capacité **abcd**, ou avec la paroi de cette capacité, paroi que nous supposons transmettre facilement le calorique. L'air se trouve par ce contact à la température même du corps **A**; **cd** est la position actuelle du piston.

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

2° Le piston s'élève graduellement et vient prendre la

position **ef**. Le contact a toujours lieu entre le corps **A** et l'air, qui se trouve ainsi maintenu à une température constante pendant la raréfaction. Le corps **A** fournit le calorique nécessaire pour maintenir la constance de température.

2 Поршень непрерывно подымается и принимает положение **ef**. Все время имеет место контакт между телом **A** и воздухом, который, таким, образом, поддерживается при постоянной температуре во все время разрежения. Тело **A** дает теплород, необходимый для поддержания постоянной температуры.

3 °Le corps **A** est éloigné, et l'air ne se trouve plus en contact avec aucun corps capable de lui fournir du calorique; le piston continue cependant à se mouvoir, et passe de la position **ef** la position **gh**. L'air se raréfie sans recevoir de calorique, et sa température s'abaisse. Imaginons qu'elle s'abaisse ainsi jusqu'à devenir égale à celle du corps **B** : à ce moment le piston s'arrête et occupe la position **gh**

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

***Примечание:**

Интересно, почему именно с положения *cd*, то есть откуда-то с самой середины одного из операций, начинает Сади Карно описание цикла? Ведь именно эта точка обозначена на верхней изотерме *pV*-диаграммы цифрой (1).

Отсутствие какой-либо *pV*-диаграммы в «Размышлениях...» Карно следует отнести к явным недостаткам этой работы. Еще в конце XVIII века Джеймс Уатт и его помощник Джон Саузерн (John Southern) изобрели индикатор – устройство для получения индикаторных диаграмм паровых двигателей (то есть фактических *pV*-диаграмм), и с тех пор индикаторные диаграммы повсеместно использовались для оценки тактико-технических показателей паровых машин, во всяком случае, в Великобритании. Вряд ли Сади Карно, столь упорно и усердно учившийся, а, самое главное, учившийся не из под палки, по принуждению, а потому, что ему это было интересно (иначе зачем бы он посещал лекции в Сорбонне и Коллеж де Франс) не знал про индикаторные диаграммы. И если Карно ставил перед собой конечную цель в том, чтобы свергнуть превосходство Англии в деле использования «огневых» машин, как их тогда называли, он просто обязан был продемонстрировать индикаторные диаграммы, и наглядно показать, чем же именно его теоретическая диаграмма лучше фактических.

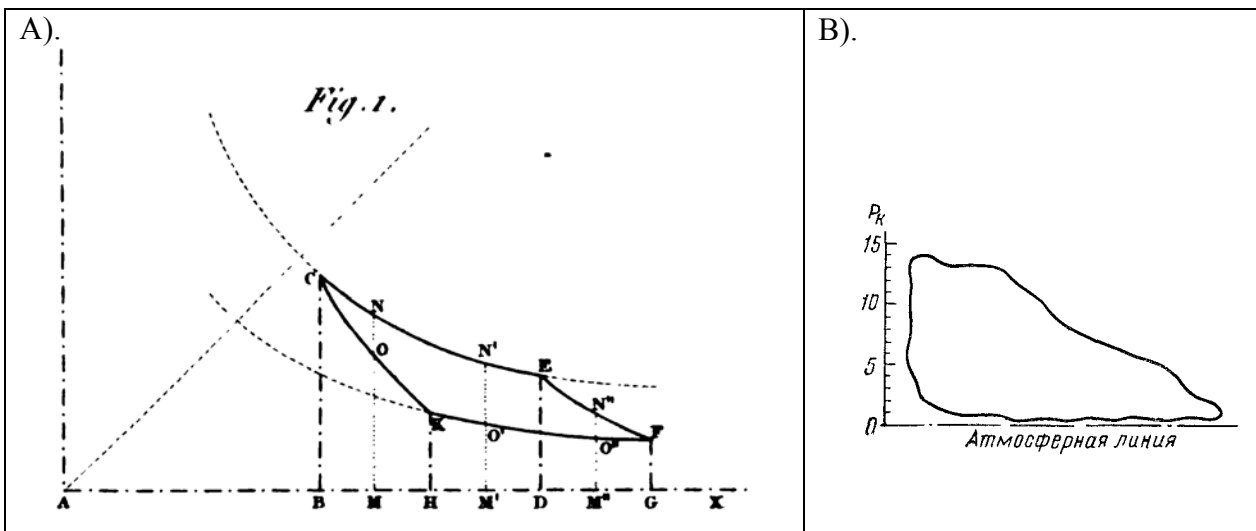


Рис. 7. Конечно, говорить о полном подобии диаграмм довольно сложно, но все же...

А). Теоретическая *pV*-диаграмма цикла Карно, по Эмилю Клапейрону. Это самое первое изображение теоретической диаграммы идеального теплового двигателя Карно.

В). Реальная индикаторная диаграмма паровой машины паровоза середины XX века в тех же самых *pV*-координатах. (Из книги А.В. Хмелевского и П.И. Смушкова «Паровоз»)

На рис. 7 А представлена самая первая в своем роде теоретическая *pV*-диаграмма цикла Карно в интерпретации Бенуа Поля Эмиля Клапейрона (Clapeyron graph), вторая четверть XIX века. На рис. 7 В представлена реальная индикаторная диаграмма одного из наиболее совершенных паровых двигателей – паровой машины паровоза середины прошлого, XX века (более ранней индикаторной диаграммы мне разыскать не удалось, к сожалению). Но примерно так же выглядели и индикаторные диаграммы и двести лет тому назад – во времена Сади Карно и Эмиля Клапейрона. Конечно, говорить о полном подобии диаграмм довольно сложно, но все же меня не оставляет чувство, что Сади Карно, сидя над своими «Размышлениями...», смотрел на реальную индикаторную диаграмму, подобную изображенной на рис. 7 В, и пытался дать ей теоретическое обоснование, опираясь на свои знания в области физики газов, но не довел это дело до конца.

За него это доделал Эмиль Клапейрон.

4° L'air est mis en contact avec le corps B; il est comprimé par le retour du piston, que l'on ramène de la position **gh** à la position **cd**, Cet air reste cependant à une température constante/à cause de son contact avec le corps B, auquel il cède son calorique.

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

5° Le corps B est écarté, et l'on continue la compression de l'air, qui, se trouvant alors isolé, s'élève de température. La compression est continuée jusqu'à ce que l'air ait acquis la température du corps A. Le piston passe pendant ce temps de la position **cd** à la position **ik**.

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

6° L'air est remis en contact avec le corps A; le piston retourne de la position **ik** à la position **ef**; la température demeure invariable.

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

7° La période décrite sous le n°3 se renouvelle, puis successivement les périodes 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5, et ainsi de suite.

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

Сразу же после описания цикла Сади Карно делает следующий глобальный вывод:

«Dans ces diverses opérations, le piston éprouve un effort plus ou moins grand de là part de l'air renfermé dans le cylindre; la force élastique de cet air varie, tant à cause des changements de volume que des changements de température; mais on doit remarquer qu'à volume égal, c'est-à-dire pour des positions semblables du piston, la température se trouve plus élevée pendant les mouvements de dilatation que pendant les mouvements de compression. Pendant les premiers, la force élastique de l'air se trouve donc plus grande, et par conséquent la quantité de puissance motrice produite par les mouvements de dilatation est plus considérable que celle qui est consommée pour produire les mouvements de compression. Ainsi l'on obtiendra un excédant de puissance motrice, excédant dont on pourra disposer pour des usages quelconques. L'air nous a donc servi de machine à feu; nous l'avons même employé de la manière la plus avantageuse possible, car il ne s'est fait aucun rétablissement inutile d'équilibre dans le calorique.

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

Ну что же, давайте разбираться, прав ли Сади Карно? Действительно, мы видим на pV -диаграмме (см. рис. 1, рис. 6, рис 7 А), что «упругая сила воздуха [то есть давление]... при равных объемах, т. е. при подобных положениях поршня» во время разрежения больше, чем во время сжатия. Смотрим на pV -диаграмму рис. 6. Линии графика (6)-(3) и (3)-(4) – линии разрежения «атмосферного воздуха внутри цилиндра» – действительно

лежат на графике выше линий сжатия (3)-(5) и (5)-(6). Эту же самую мысль наглядно демонстрировал на своей диаграмме Эмиль Клапейрон (см. рис. 7 А). На диаграмме Клапейрона изображены три типичные точки на оси абсцисс диаграммы (соответствующие различным положениям поршня) – М, М' и М'' и показаны соответствующие этим положениям поршня ординаты (давление) – при расширении N, N' и N'', при сжатии O, O' и O''. Значение давления N в точке М больше чем значение давления O, N' больше чем O', N'' больше чем O''.

С момента получения самой первой индикаторной диаграммы в конце XVIII века, по площади фигуры, нарисованной индикатором, инженеры начали судить о мощности и производительности того или иного парового двигателя. Так как на любой теоретической pV -диаграмме цикла Карно, будь то рис. 1, рис. 6, или диаграмма Клапейрона (рис. 7 А), две изотермы и две другие кривые формируют некую фигуру, смутно напоминающую реальную индикаторную диаграмму (см. рис. 7 В), то мысль Карно, о получении подобным способом «излишка движущей силы, излишка, который можно на что-нибудь употребить», представляется весьма правдоподобной. Именно этот довод говорит в пользу того, что при работе над своими «Размышлениями...» Сади Карно разглядывал реальную индикаторную диаграмму. В противном случае ему было бы ой как непросто прийти к своим выводам.

Теперь давайте ответим на вопрос, чему же равен этот «годный к употреблению излишек». Давайте вместе рассмотрим описанный Сади Карно цикл с позиций механики Ньютона, с позиций того, что нам известно о газах и их свойствах сегодня, опираясь на опытные данные и практические результаты, полученные человечеством в течение последних двух веков, прошедших с тех времен.

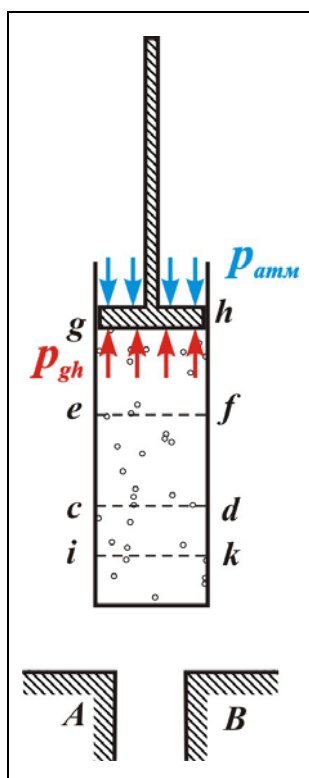


Рис.8. Идеальный двигатель Карно в исходном состоянии.

Принимаем условия Карно. Допустим, у нас имеется цилиндр с невесомым (чтобы не отвлекать внимание в уравнениях на действие силу тяжести и инерцию) поршнем внутри (см. рис. 8). Трение между поршнем и цилиндром равно нулю. Цилиндр наполнен газом.

Любой грамотный инженер знает и понимает, что вечных двигателей в природе не существует. Во всяком случае, до сих пор все попытки изобрести вечный двигатель оканчивались неудачей. И пока нет никаких оснований думать, что в будущем это изменится.

Любой реально существующий двигатель может находиться в двух состояниях – в рабочем состоянии, когда он производит какую-либо механическую работу и в нерабочем состоянии, в состоянии покоя – когда, например, хранится на складе. Это только вечные двигатели обязаны работать и на складах, и на полках магазинов при их распродаже. Идеальный тепловой двигатель Карно, так как он не является вечным двигателем, не может быть исключением. Какое же положение поршня соответствует складскому, нерабочему состоянию идеального двигателя Карно? Другими словами, какая же именно точка на pV -диаграмме, изображенной на рис. 6, соответствует точке покоя, точке **истинного начала** цикла Карно?

Вряд ли это точка (3) (см. рис. 6), с которой решил повторять свой цикл сам Сади Карно. Цитирую: «7 Период, описанный в п. 3, повторяется, затем следует 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 и т. д.». И, что интересно, это вовсе не точка (1) на рис. 1 (или соответствующая ей

точка (6) на рис. 6), с которой почему-то принято начинать цикл Карно всеми без исключения современными физико-математиками.*

Анализируя цикл Карно, мы неизбежно приходим к выводу о том, что состояние покоя для двигателя Карно – это точка (4) на рис. 6, соответствующая положению поршня *gh*.

Дело в том, что начинается цикл Карно с того, что поршень начинает сжимать находящийся внутри цилиндра газ, двигаясь под действием некоей внешней силы. Об этом Карно предельно ясно говорит в пункте 4 описания цикла: «...воздух [внутри цилиндра] ... сжимается движением поршня, который переходит из положения *gh* в положение *cd*.» То есть воздух внутри цилиндра не самопроизвольно сжимается, как бы «втягивая» поршень за собой, а сжимается потому, что поршень движется вниз. Добавлю – движется вниз под действием некоей внешней силы.

Именно точка (4) *pV*-диаграммы на рис. 6, точка, когда поршень находится в положении *gh*, соответствует состоянию равновесия идеального двигателя Карно – как термодинамического равновесия (рабочее тело не передает и не принимает теплоту), так и механического (рабочий орган двигателя – поршень – находится в состоянии статического и динамического равновесия). По условиям идеальности, придуманным самим Карно, отсутствует сила трения между поршнем и стенками цилиндра, а сам поршень невесом. То есть нам разрешено не учитывать ни силу трения, ни вес поршня. Тогда, из условия статического равновесия поршня $\sum F = 0$ получаем следующее уравнение:

$$S \cdot p_{gh} = S \cdot p_{атм}, \text{ где:}$$

S – площадь поршня, а

p_{атм} и *p_{gh}* – соответственно атмосферное давление и давление газа - рабочего тела внутри рабочего цилиндра. Откуда:

$$p_{gh} = p_{атм}.$$

Мало кто из физиков-теоретиков, описывающих цикл Карно, осознает, что идеальный тепловой двигатель Карно (рис. 4 и рис. 8) по своей сути никакой не двигатель, а всего лишь довольно специфичный аккумулятор механической энергии (с подзарядкой). При сжатии газа внутри цилиндра он накапливает механическую энергию, а при расширении – возвращает накопленную энергию в виде механической работы.

*** Примечание.**

Несмотря на то, что различных интерпретаций цикла Карно не счесть, почему-то во всех них принято начинать цикл Карно из самой что ни на есть середины этого цикла. Почему исторически сложилось так, а не иначе, мне судить трудно – очень многие стереотипы не имеют рационального объяснения. Это видно на учебном плакате, изображенном на рис. 1, во всех школьных учебниках и институтских курсах общей физики, примеры из которых я привожу ниже.

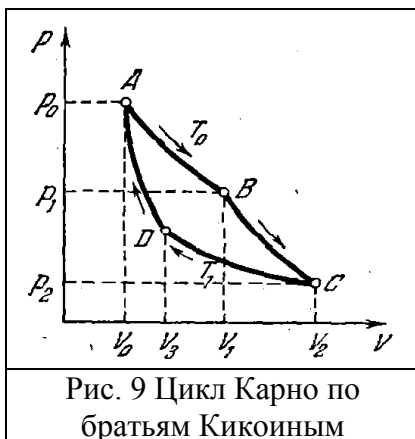


Рис. 9 Цикл Карно по братьям Кикоиным

Вот, например, как об этом написано в одном довольно неплохом курсе по физике, А.К. Кикоин, И.К. Кикоин «Общий курс физики. Молекулярная физика. Издание второе, переработанное»: «Начнем круговой процесс над рабочим телом с того, что оно, **сжатое до некоторого давления**, находится в контакте с нагревателем и, следовательно, имеет такую же, как он, температуру *T₀* (точка *A* на рис. 9).»

То есть, рабочее тело (газ внутри цилиндра) в положении *A*, которое соответствует положению поршня *ik* в описании самого Карно, находится в некоем сжатом состоянии. Разумеется, сразу же возникает вопрос – как и за счет чего рабочее тело оказалось в «сжатом состоянии»?

Увы, братья Кикоины не дают на него ответ, так что приходится додумывать самим.

***Продолжение примечания:**

Читаем «Курс физики» Б.Б Кудрявцева (см. рис. 10): «...Допустим, что начальное (1) состояние системы определяется значениями параметров состояния $p_1 V_1 T_1$.

...
Для возвращения системы в исходное состояние **подвергнем газ, находящийся в результате адиабатного расширения при более низкой температуре T_2 , [имеется в виду – из состояния (3) на рис. 10] изотермическому сжатию до объема V_4 . Давление в системе возрастет при этом до величины p_4 . Изотермическое сжатие газа потребует работы A_{3-4} , равной**

$$A_{3-4} = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4} \text{ » и так далее.}$$

Встает вопрос – а как подвергнуть газ, находящийся в состоянии (3), см. рис. 10, изотермическому сжатию? Сам по себе он сжиматься не будет. Температура этого газа T_2 равна температуре «холодильника», так что о теплообмене речь идти не может. Вот если бы температура «холодильника» была ниже температуры газа внутри двигателя Карно – тогда другое дело. Тогда был бы возможен теплообмен между рабочим телом и холодильником, температура рабочего тела падала, а его давление – уменьшалось, и под действием внешнего, атмосферного давления, поршень стал бы опускаться вниз, как бы «сжимая» газ. Но так как температура газа внутри цилиндра и «холодильника» равны, то мы неизбежно придём к мысли, что сжатие возможно только за счет действия некоей внешней силы.

Некоторые интерпретации цикла Карно вообще поражают своими грандиозными замыслами, превосходящими по своей масштабности даже замыслы разворота сибирских рек в сторону Москвы. Заглянем, например, в «Курс общей физики» бывшего профессора Московского физико-технического института Д.В. Сивухина. Цикл Карно, по Дмитрию Васильевичу, заключается в следующем: «...сначала система, имея температуру T_1 , приводится в тепловой контакт с нагревателем. Затем, **бесконечно медленно уменьшая внешнее давление, ее заставляют квазистатически расширяться по изотерме...**».

Поясню, если кто не понял. Внешнее давление – это, для тепловых двигателей, работающих в земных условиях, атмосферное давление, то есть давление атмосферы Земли. Вспоминается: «...И создал Бог твердь, и отделил воду, которая под твердью, от воды, которая над твердью. И стало так. И назвал Бог твердь небом...» По существу, Дмитрий Васильевич предлагает для обеспечения работы идеального двигателя Карно нанять господ Бога. А кто еще сможет управиться с работой по «бесконечно медленному уменьшению» давления Земной атмосферы? Я так понимаю, это под силу лишь самому Создателю этой атмосферы (тверди под названием небо).

Многие физики-теоретики утверждают, будто бы цикл Карно – самый экономичный цикл из всех существующих. Ну, не знаю. Хотелось бы, чтобы кто-нибудь из них посчитал, хотя бы примерно, расходы на изменение атмосферного давления Земли или бы проконсультировался у Создателя, за какую сумму в денежном выражении тот возьмется за подобную работу.

Скажу на всякий случай. Я знаю о существовании барометров и о том, что атмосферное давление меняется в силу природных явлений. Кстати, на основе механического барометра вполне можно изготовить генератор энергии. В качестве игрушки, поскольку практического применения подобный генератор не найдет.

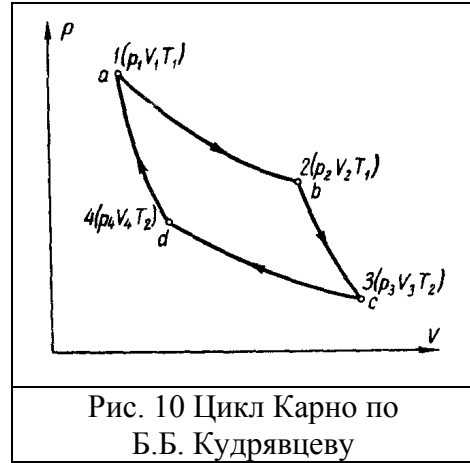


Рис. 10 Цикл Карно по Б.Б. Кудрявцеву

Поясню свою мысль. Дело в том, что рабочее тело внутри идеального двигателя Карно (см. рис. 11 А) ведет себя аналогично обыкновенной стальной пружине (см. рис. 11 В), которая часто используется как аккумулятор механической энергии. Давайте перед тем, как перейти к циклу Карно, детально разберем пример – как происходят процессы накопления и возврата механической энергии при сжатии и последующем растяжении пружины.

Сжимая пружину, мы накапливаем механическую энергию, которую позже можем с «пользой для себя употребить». Аналогичным образом мы накапливаем механическую энергию, натягивая тетиву, прежде чем выстрелить из лука или из арбалета, или швырнуть во врага каменное ядро баллистой. Мы аккумулируем механическую энергию, когда заводим механические часы или детскую игрушку. Мы накапливаем механическую энергию и затем используем ее с пользой для себя. См. рис. 11:

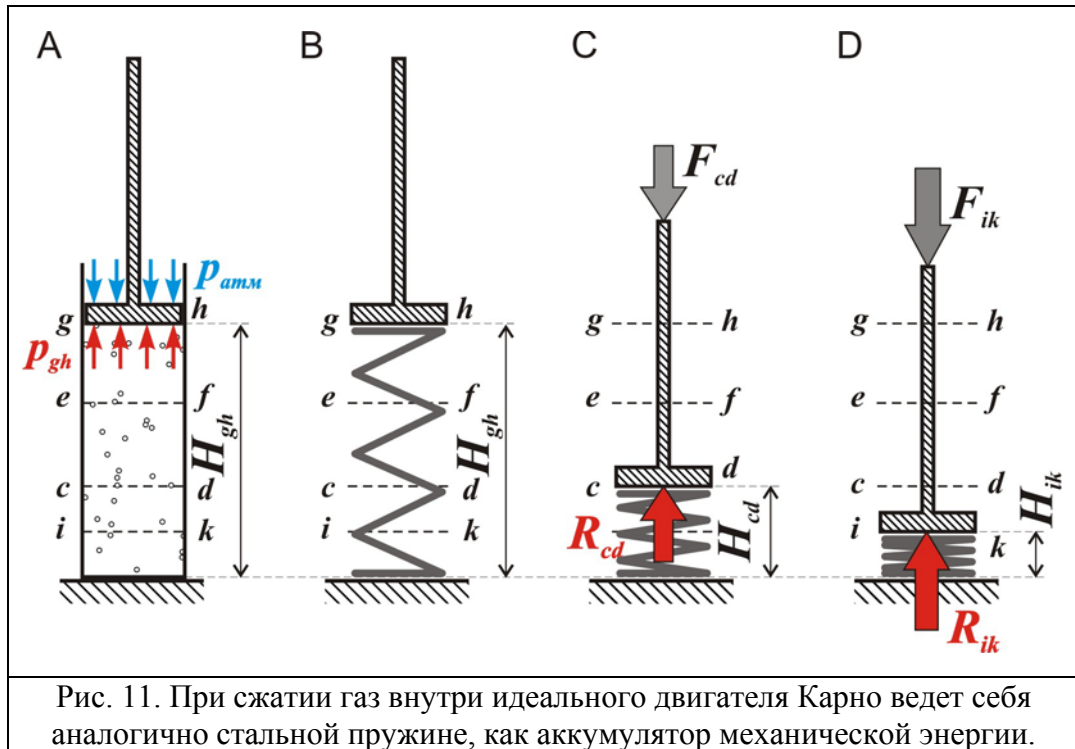


Рис. 11. При сжатии газ внутри идеального двигателя Карно ведет себя аналогично стальной пружине, как аккумулятор механической энергии.

Сжимая пружину, мы, затрачивая энергию, выполняем механическую работу. Эта работа равна площади треугольника с вершинами в точках (В), (D) и (ik) на рис. 13 А:

$$W = A_{сжатия} = \int_{gh}^{ik} F(-dH).$$

Почему $(-dH)$, а не просто (dH) , можете поинтересоваться Вы? Ведь обычно в своих умных книжках физики-теоретики, кандидаты и доктора физико-математических наук так не пишут? Отвечу. Просто таковы правила интегрирования. Если мы определяем интеграл некоей функции не как обычно, слева направо, то есть при инкрементации аргумента функции (H), а «по-арабски», справа – налево, при декрементации аргумента, то соответственно, должны высчитывать интеграл не по (dH) , а по $(-dH)$.

Выполнив операцию по выносу знака минус $(-)$ за знак интеграла, и поменяв затем пределы интегрирования, получим:

$$A_{сжатия} = \int_{gh}^{ik} F(-dH) = - \int_{gh}^{ik} FdH = \int_{ik}^{gh} FdH$$

То есть, расходуя механическую энергию W , мы выполняем **положительную** работу $A_{сжатия}$ по сжатию пружины (или натягиванию тетивы арбалета). Нажав на спусковой крючок, распрямляющаяся пружина (или тетива арбалета) тоже выполнит

полезную **положительную*** работу, например по метанию стрелы во врага – придав стреле необходимую кинетическую энергию, импульс движения.

В нашем случае с пружиной, максимальная полезная механическая работа, которую сможет совершить эта пружина, будет равна:

$$A_{\text{растяжения}} = \int_{ik}^{gh} R dH .$$

КПД такого пружинного аккумулятора механической энергии равно 1:

$$\eta_{\text{аккумулятора}} = \frac{A_{\text{растяжения}}}{W} = \frac{\int_{ik}^{gh} R dH}{\int_{ik}^{gh} F dH} = 1 ,$$

так как для любого положения «поршня», изображенного на рис. 11 $F = R$. Физический смысл этого таков – вся накопленная аккумулятором энергия без потерь расходуется на выполнение полезной работы.

Точно так же, как и в случае со стальной пружиной, надавливая на поршень идеального двигателя мы накапливаем механическую энергию, см. рис. 12. Как мы уже установили, в исходном положении (см. рис. 12. В), в начале рабочего цикла, в соответствии с замыслом Карно, поршень занимает положение **gh**, что соответствует точке (4) на pV -диаграмме на рис. 6. Рабочий цикл начинается со сжатия рабочего тела. Для этого необходимо надавить на поршень сверху, или, говоря языком физики, приложить к поршню некоторую силу **F**, действующую на поршень сверху вниз.

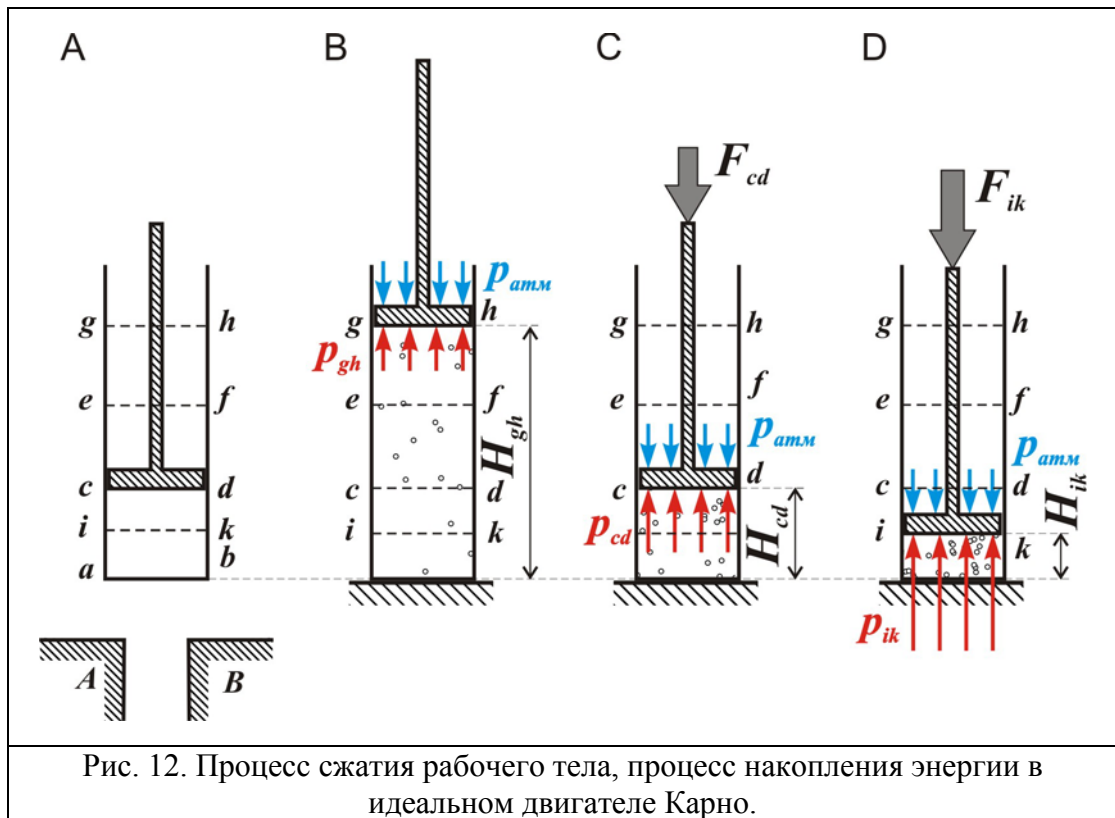
***Примечание:**

Осиливших мою статью до этого места, прошу задуматься над следующим.

Когда-то давно, физики вдруг стали делить работу на «положительную» и «отрицательную», нисколько не задумавшись над тем, что все физические величины суть величины положительные. Масса, длина, количество вещества, время, температура, сила тока, давление, скорость, площадь, объем, механическая сила, плотность...

Многие, даже самые именитые физики, как-то пропускают мимо своего сознания тот факт, что это только **проекция векторных** физических величин, то есть величин, одной из характеристик которых является направление, на какую-либо ось координат может быть отрицательной, но никак не сами эти физические величины. Работа же – ну никоим образом не векторная величина. И поэтому деление ее на «положительную» и «отрицательную» лишний раз доказывает верность постулата Альберта Эйнштейна о бесконечности, вынесенного в эпиграф этой статьи.

Очень часто физики при описании термодинамических процессов отмечают, что работа газа равна площади под кривой на pV -диаграмме изменения состояния этого газа. Интересно, а кто-нибудь и когда-нибудь видел отрицательную площадь? Нет. Но вот про «отрицательную работу» газов написано в любом учебнике по термодинамике.



Давайте сначала посмотрим, как можно выполнить рабочий цикл, если не производить никаких манипуляций с тепловыми резервуарами *A* и *B*, то есть с «холодильником» и «нагревателем», см. рис. 12 А.

Приложив силу, равную F_{cd} , мы добьемся того, что поршень перейдет в положение *cd* (см. рис. 12 С). Для этого положения поршня будет справедливо равенство:

$$S \cdot p_{cd} = S \cdot p_{атм} + F_{cd}.$$

Надавив на поршень сильнее, то есть увеличив внешнюю силу, действующую на поршень, до некоей величины F_{ik} , можно заставить поршень опуститься ниже, до положения *ik* (см. рис. 12 D):

$$S \cdot p_{ik} = S \cdot p_{атм} + F_{ik}$$

Сжимая газ, внешняя сила F , с которой мы давим на поршень плюс атмосферное давление $p_{атм}$ совместно выполняют некую работу. Другими словами, на сжатие газа внутри цилиндра, расходуется некая энергия W , которая ввиду отсутствия трения между поршнем и цилиндром, вся, без исключения, уходит на накопление рабочим телом энергии:

$$W = A_F + A_{p_{атм}} = \int_{gh}^{ik} F(-dH) + \int_{gh}^{ik} p_{атм}(-dV), \text{ где.}$$

$p_{атм}$ – атмосферное давление окружающего воздуха,

F – величина внешней силы,

H – высота поднятия поршня,

V – объем, занимаемый газом внутри цилиндра.

Так как $F(dH) = \frac{F}{S}(dV)$, где S – площадь поршня, то, вынеся знак минус (-) за знак

интеграла, а, затем, поменяв пределы интегрирования, и объединив оба интеграла в один, получим:

$$W = -\int_{gh}^{ik} \frac{F}{S} dV - \int_{gh}^{ik} p_{атм} dV = \int_{ik}^{gh} \left(\frac{F}{S} + p_{атм} \right) dV. \quad [11]$$

Если проводить все эти операции по сжатию достаточно быстро, то весь процесс сжатия будет протекать практически как адиабатный. pV -диаграмма этого процесса изображена на рис. 13 в кривой В-С-D. Точки (В), (С) и (D) этой кривой соответствуют положениям поршня на рис. 12 В, С и D соответственно. Тонкими линиями показана «каноническая» диаграмма цикла Карно. Давление газа в этом случае изменяется в соответствии с уравнением Симеона Дени Пуассона:

$$pV^k = const, \text{ где:}$$

p – давление газа,

V – его объём,

$k = \frac{c_p}{c_V}$ – показатель адиабаты, а c_p и c_V – теплоёмкости газа соответственно при

постоянном давлении и постоянном объёме.

Хочется отметить, что даже теоретические показатели адиабаты различны для различных газов – в зависимости от состава молекул этих газов. Так, принято считать, что для одноатомных газов $k \cong \frac{5}{3}$, а для двухатомных $k \cong \frac{7}{5}$, для трёхатомных $k \cong \frac{4}{3}$. Так как в цикле Карно присутствуют две адиабаты, то теоретические pV -диаграммы для одно-, двух-, трех- и многоатомных газов будут различны. Этот факт, кстати, лишней раз заставляет усомниться в теореме Карно, будто бы «*термический КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела*».

Ведь очевидно, что $pV^{\frac{5}{3}} \neq pV^{\frac{7}{5}} \neq pV^{\frac{4}{3}}$! Поэтому, при всех остальных одинаковых параметрах, таких, как температуры «нагревателя» и «холодильника», количество теплоты, полученной рабочим телом от «нагревателя» и переданной им «холодильнику», площади фигур, ограниченные двумя изотермами и двумя адиабатами будут различны. То есть количество максимально полезной работы, которая численно равна площади фигуры, ограниченной изотермами и адиабатами, выполненной одно-, двух-, трех- и многоатомными газами, будут различны при равенстве всех остальных параметров цикла Карно. Не верите? Постройте pV -диаграммы!

При адиабатном сжатии газа

$$\frac{F}{S} + p_{амм} = p_{ад}, \text{ где} \quad [12]$$

$p_{ад}$ – давление газа внутри цилиндра с поршнем, изменяющееся в соответствии с уравнением Пуассона.

Подставив уравнение [12] в уравнение [11] получим, что при адиабатном сжатии газа была произведена работа, равная

$$A_{сж.ад.} = \int_{gh}^{ik} \left(\frac{F}{S} + p_{амм} \right) dV = \int_{ik}^{gh} p_{ад} dV.$$

Если в момент максимального сжатия рабочего тела, при положении поршня ik , убрать внешнюю силу, позволив газу адиабатно расширяться (примерно то самое происходит, когда мы открываем шампанское, сняв проволочку удерживающую пробку в бутылке – сжатый углекислый газ адиабатно расширяется, стреляя пробкой в потолок), газ выполнит полезную работу, в идеальном варианте равную:

$$A_{расшир.ад.} = \int_{ik}^{gh} p_{ад} dV.$$

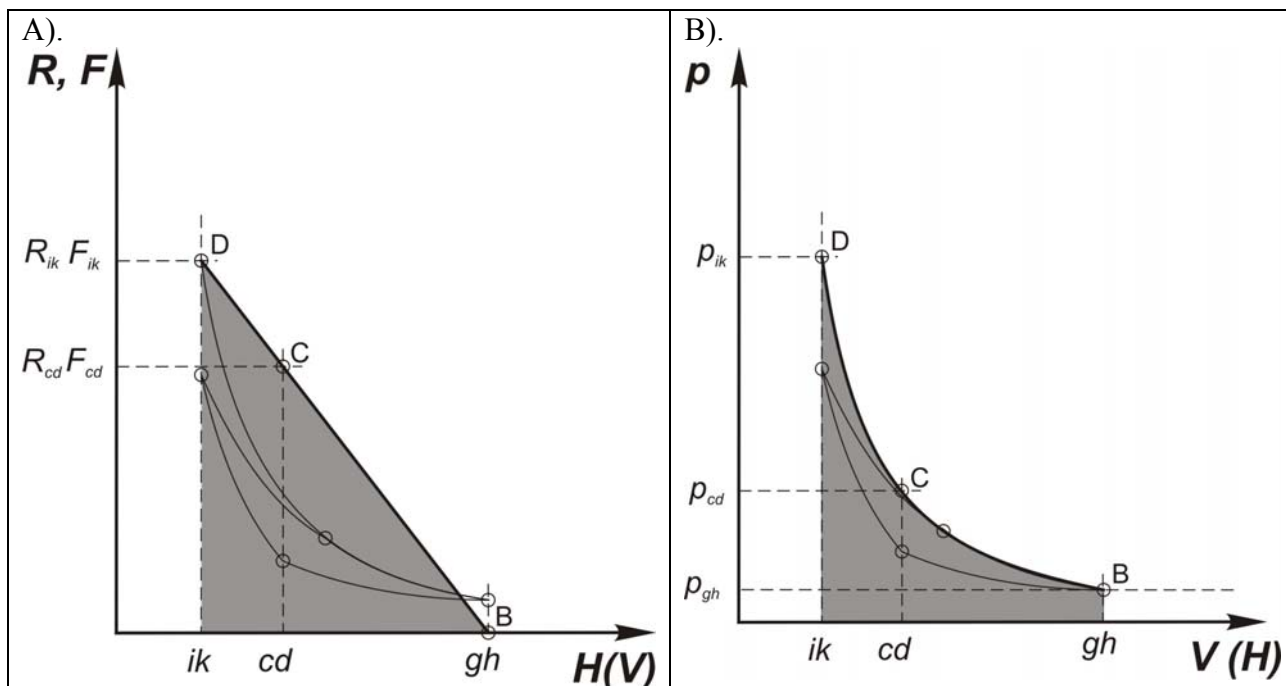


Рис. 13. Диаграммы рабочих циклов: А). пружинного и В). «идеального газового адиабатного» аккумуляторов. Тонкими линиями показан «канонический» цикл Карно.

А). – площадь заштрихованной фигуры (B)-(D)-(ik) равна энергии W , затраченной на сжатие пружины из положения gh в положение ik и, соответственно, равна величине работы $A_{\text{растяжения}}$, которую может совершить эта пружина.

В). – площадь заштрихованной фигуры (gh)-(B)-(C)-(D)-(ik) равна энергии W , затраченной на адиабатное сжатие газа из положения gh в положение ik и, соответственно, равна величине работы $A_{\text{расшир.ад.}}$, которую может совершить этот газ при адиабатном же расширении, если не давать возможности газу остыть во время хранения «во взведенном состоянии».

Разница только в том, что процесс накопления и возврата накопленной механической энергии для пружины идет по «прямой» (разумеется, если мы не вылезем за пределы действия закона Гука) а в случае газа – по «кривой», по адиабате.

Разумеется, накопленная энергия может быть использована для какой-нибудь более полезной работы, чем стрельба пробками от шампанского в потолок. Например, для подъема какого-либо груза, или, через кривошипно-шатунный механизм, для вращения винта корабля, вращения колеса транспортного средства и т.п.

Как видно из диаграммы рис. 13 В, $W = A_{\text{сж.ад.}} = A_{\text{расшир.ад.}}$, то есть вся затраченная в период сжатия рабочего тела энергия «до последней копейки» была возвращена идеальным двигателем, выступающим в роли идеального газового аккумулятора механической энергии. КПД такого аккумулятора механической энергии получается равным 1:

$$\eta_{\text{газового_аккумулятора}} = \frac{A_{\text{расшир.ад.}}}{W} = \frac{\int_{ik}^{gh} p_{\text{ад.}} dV}{\int_{gh}^{ik} p_{\text{ад.}} dV} = 1.$$

как и положено для всякого уважающего себя идеального аккумулятора.

Разобрав эти два примера, давайте попытаемся понять, что же произойдет, если мы поступим так, как рекомендовал Карно: «...воздух [внутри цилиндра] приведен в соприкосновение с телом B [холодильником]; он сжимается движением поршня [вследствие действия на поршень внешней силы F], который переходит из положения gh в положение cd ». Предположим, что на этот раз операцию по сжатию «воздуха», в смысле – газа внутри цилиндра, выполняющего функции рабочего тела, мы проводим достаточно медленно, обеспечивая необходимый теплообмена между рабочим телом и окружающей средой – то есть атмосферой, которая на этот раз у нас будет играть роль «холодильника», тела B в описании самого Карно. То есть, будем добиваться того, чтобы «воздух оставался при постоянной температуре благодаря контакту с телом B , которому он отдает свой теплород» [свою внутреннюю энергию].

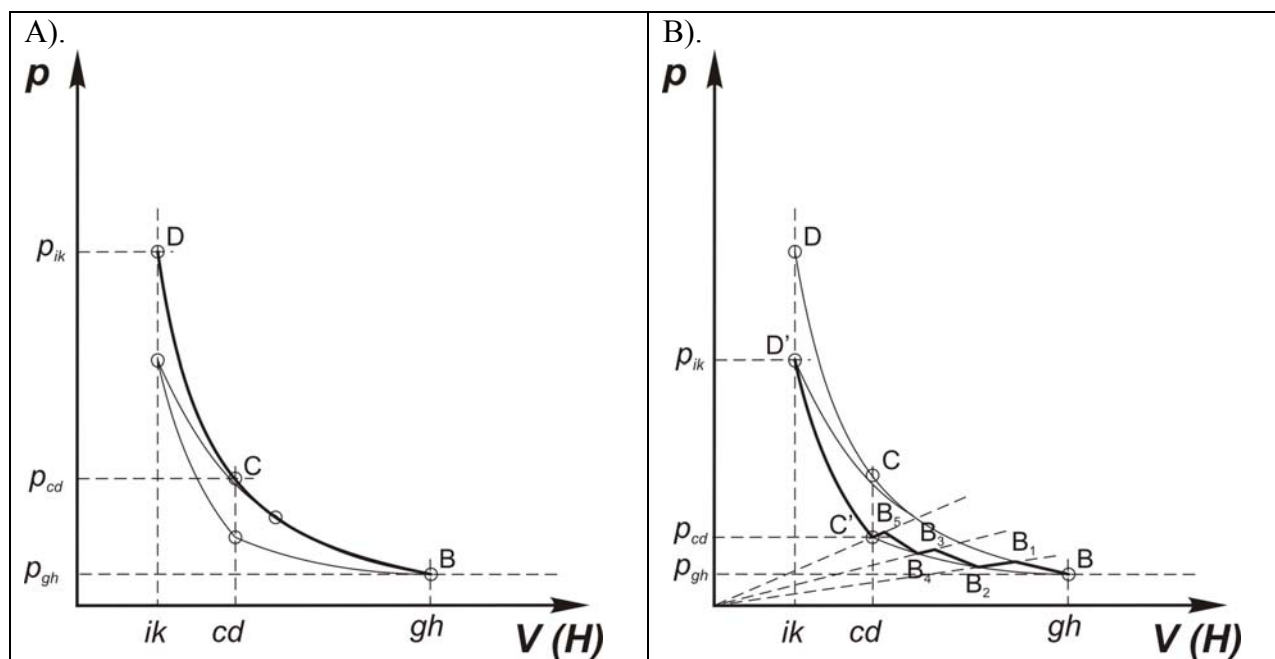


Рис. 14. pV -диаграммы процесса сжатия газа внутри цилиндра:

А). – при быстром, адиабатном сжатии (тонкими линиями показан «классический» цикл Карно),

В). – при сжатии газа по задумке Сади Карно и технологии Д.В. Сивухина.

Разумеется, добиться при сжатии газа из положения gh в положение cd добиться полного, 100%-ного соответствия изотерме невозможно. Но можно воспользоваться идеей, которую высказал уже упоминавшийся профессор Дмитрий Васильевич Сивухин в своем «Общем курсе физики» [14]. Там, на странице 95 при описании обратимых и необратимых процессов, он предложил увеличивать сверху давление на поршень, что называется, «по песчинке». Чем меньше будут эти «песчинки», тем ближе к изотерме получим график. На рис. 14 В показана pV -диаграмма такого, квазиизотермического, процесса, при условии, что таких «песчинок» – три. То есть газ из состояния В в состояние С' переводится за шесть шагов:

1). На поршень сверху кладется первая «песчинка», в результате чего газ адиабатически (от этого никуда не деться) переходит из состояния В в состояние B_1 . Принято говорить, что газ при этом нагревается. Но это – не совсем верно. Дело в том, что при адиабатическом процессе передачи тепловой энергии, по определению, не происходит. То есть нагрева газа (и бытовом, и в научном понимании) не происходит! А вот температура газа – повышается. Кажется – парадокс? Нагрева нет, а температура – повышается. Никакого парадокса. Таково свойство веществ, находящихся в газообразном агрегатном состоянии. Количество внутренней энергии при любых адиабатных изменениях состояния некоторого количества вещества, находящегося в газообразном состоянии остается неизменным. И температура каждой отдельно взятой

молекулы газа не меняется. А вот средняя, скажем так, удельная температура на некий объем – меняется, так как изменяется количество молекул в этом объеме. Чем больше молекул в некоем объеме пространства, тем выше удельная температура в этом объеме.

- 2). «Нагревшийся» в результате адиабатического сжатия газ оставляется на некоторое время остывать. То есть, происходит обмен теплотой с более холодной атмосферной. При этом температура газа падает, и поршень немного опускается как бы «самопроизвольно» до тех пор, пока температуры «рабочего тела» и «холодильника» не выровняются. На pV -диаграмме это показано линией $V_1 - V_2$.
- 3). На поршень сверху кладется вторая «песчинка», газ адиабатически переходит из состояния V_2 в состояние V_3 .
- 4). Газ вновь оставляется остывать – в соответствии с линией $V_3 - V_4$ pV -диаграммы.
- 5),6). Аналогичные действия повторяются, и газ – рабочее тело переходит в состояние C' .

Получившийся график $V-V_1-V_2-V_3-V_4-V_5-C'$ (рис. 14 В), с определенной долей погрешности можно считать за изотерму $V-C'$. Разумеется, если максимально уменьшить размер (то есть вес) «песчинок» (кстати, даже чисто теоретически минимально возможная величина дискретна – один атом), мы сможем добиться того, что получим ломаную линию, мало отличающуюся от идеальной, теоретической, изотермы.

На следующем этапе, после того, как мы сумели квазиизотермически перевести поршень в положение C' , надавим на него посильнее – адиабатически сожмем газ до состояния D' .

Что же нам дает обмен тепловой энергией между рабочим телом и «холодильником» во время сжатия по сравнению с чисто адиабатным сжатием?*

Во-первых, для достижения положения ik нам потребовалось приложить внешнюю силу, меньшую по величине, чем при чисто адиабатическом процессе, то есть **затратить на сжатие МЕНЬШЕЕ количество энергии**.

Соответственно, и количество накопленной газом энергии, при его сжатии по описанной выше квазиизотермическо-адиабатной технологии – меньше, чем при чисто адиабатическом процессе, так как меньше давление газа при том же конечном положении поршня.

*Примечание:

Подобные процессы накопления и дальнейшего использования с «пользой для дела» накопленной механической энергии весьма широко используются на практике. Особенно показательны в этом отношении пневматические винтовки компрессионного и пружинно-поршневого типов. Редко встретишь человека, который никогда не стрелял из пружинно-поршневой пневматической винтовки в развлекательных тирах. В нашей стране наиболее часто встречаются так называемые «переломки» производства ижевского завода, где ствол исполняет функцию рычага взведения. Заряжая винтовку, вы при помощи рычага сжимаете боевую пружину. Спустив курок, пружина, разжимаясь, толкает поршень, создавая в камере избыточное давление воздуха, которое и выталкивает пулю из канала ствола, сообщая ей необходимую энергию. То есть накопленная пружиной-аккумулятором механическая энергия преобразуется в энергию сжатого воздуха, который и сообщает пуле некий импульс движения, некую кинетическую энергию.

Но более показательны не столь распространенные в России компрессионные пневматические винтовки. В компрессионных винтовках нужное давление воздуха в камере обычно достигается нагнетанием воздуха. Правда, в некоторых моделях, для того, чтобы подготовить винтовку к полноценному выстрелу, обычно требуется 8-12 качков. Компрессионная пневматическая винтовка, пожалуй, самый яркий пример газового аккумулятора механической энергии. Накачкой воздуха в камеру, в ней создается избыточное давление, которое впоследствии «можно с пользой употребить» для выстрела. Кстати, если непосредственно перед выстрелом накаченный в камеру воздух еще и хорошенько нагреть, то можно существенно повысить дальность выстрела.

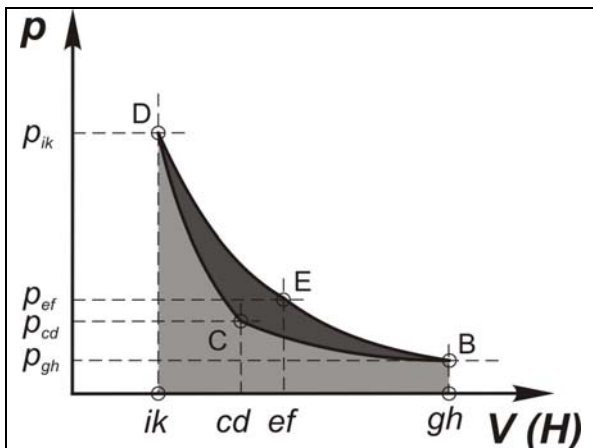


Рис. 15. Работа внешней силы, атмосферного давления и рабочего тела идеальной тепловой машины при выполнении цикла Карно.

Итак, сжимая рабочее тело в соответствии с замыслом Сади Карно и «по технологии» Дмитрия Васильевича Сивухина, мы получаем две кривые – изотерму В-С и адиабату С-D (см. рис. 15). Совместная (**положительная!**) работа внешней силы F , атмосферного давления окружающего воздуха, и «холодильника», отбирающего у рабочего тела «излишки» теплоты, численно равна площади фигуры $gh-B-C-D-ik$. Само собой разумеется, рабочее тело, то есть газ внутри цилиндра никакой «отрицательной работы» при этом не совершает. Он лишь препятствует совершению совместной работы внешней силой, атмосферным давлением и «холодильником».

Работа, (а, значит, и затраченная на это энергия) перевода двигателя Карно из состояния В в состояние D, будет равна:

$$W = A_{сж.Карно} = \int_{gh}^{cd} p_{изотерм.} (-dV) + \int_{cd}^{ik} p_{ад.} (-dV).$$

То есть, как и положено, она равна сумме площадей фигур $gh-B-C-cd$ и $cd-C-D-ik$. Изменив пределы интегрирования на противоположные, получим:

$$A_{сж.Карно} = \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV + \int_{ik}^{cd} p_{ад.} dV \quad [13]$$

Следующим этапом цикла, в соответствии с задумкой Карно, является изотермическое расширение рабочего тела по изотерме D-E, когда некий «нагреватель» подпитывает идеальный двигатель-аккумулятор тепловой энергией. Заканчивается цикл адиабатным расширением газа внутри цилиндра E-B. При этом совершает работу (опять же положительную) газ внутри цилиндра. Эта работа расширения, то есть максимально возможная полезная работа, которую может выполнить идеальный двигатель Карно, численно равна площади фигуры $ik-D-E-B-gh$. (см. рис. 15):

$$A_{расш.Карно} = \int_{ik}^{ef} p_{изотерм.} dV + \int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV. \quad [14]$$

Очевидно, что площадь фигуры $ik-D-E-B-gh$ больше площади фигуры $gh-B-C-D-ik$. Это означает, что работа, которую совершает при расширении газ внутри идеального двигателя Карно, больше, чем работа, которую затратили на «завод» (по аналогии с заводом часовой пружины или игрушки) двигателя-аккумулятора. То есть действительно имеет место некий «избыток движущей силы». Величина этого самого пресловутого «избытка», разумеется, численно равна разнице площадей этих фигур.

И вот теперь мы приступаем к самому интересному. За счет чего возник этот избыток? Что же изменилось по сравнению с рассмотренной ранее работой идеального двигателя в качестве «адиабатного газового аккумулятора», при которой никаких «избытков движущей силы» не возникало? Разумеется, за счет использования тепловой энергии, которая сначала отбиралась от рабочего тела «холодильником» (обозначим это **количество** теплоты $Q_{хол}$) в процессе изотермического сжатия D-C, а потом сообщалась ему «нагревателем» ($Q_{нагр}$) в процессе изотермического расширения в процессе D-E.

Посчитаем величину «избытка движущей силы» A , «который можно на что-то употребить». Итак, мы установили, что она будет равна площади фигуры В-С-D-E, ограниченной двумя изотермами и двумя адиабатами:

$$A = A_{расш.Карно} - A_{сж.Карно} = \int_{ik}^{ef} p_{изотерм.} dV + \int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV - \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV - \int_{ik}^{cd} p_{ад.} dV .$$

Просто переставив местами слагаемые, можем записать это уравнение в следующем виде:

$$A = \int_{ik}^{ef} p_{изотерм.} dV - \int_{ik}^{cd} p_{ад.} dV + \int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV - \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV . \quad [15]$$

А вот теперь, для большей наглядности (на поиск чего я и потратил почти два года – можете посмеяться) давайте рассмотрим частный случай, один из возможных вариантов цикла Карно – когда высота поршня, а, значит, и объем газа в положении поршня cd и в положении ef совпадают (см. рис. 16). Между любыми двумя изотермами, из бесконечного количества разных вариантов всегда можно выбрать такой вариант цикла Карно. Сделать это на удивление просто. Из точки (В) надо построить адиабату (в соответствии с уравнением Симеона Дени Пуассона, одного из профессоров, обучавших в свое время Сади Карно в Политехнической Школе). Абсцисса точки пересечения этой адиабаты и верхней, «горячей» изотермы и будет искомым положением $cd = ef$.

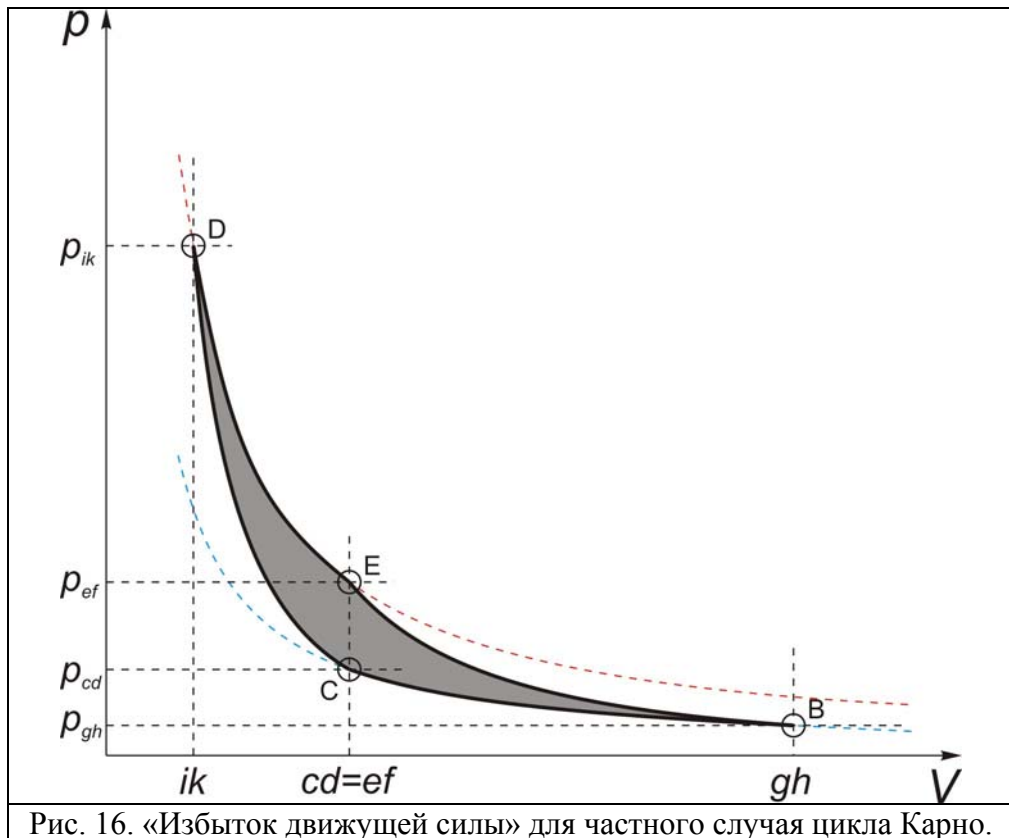


Рис. 16. «Избыток движущей силы» для частного случая цикла Карно.

Давайте проанализируем первые два члена правой стороны уравнения [15]:

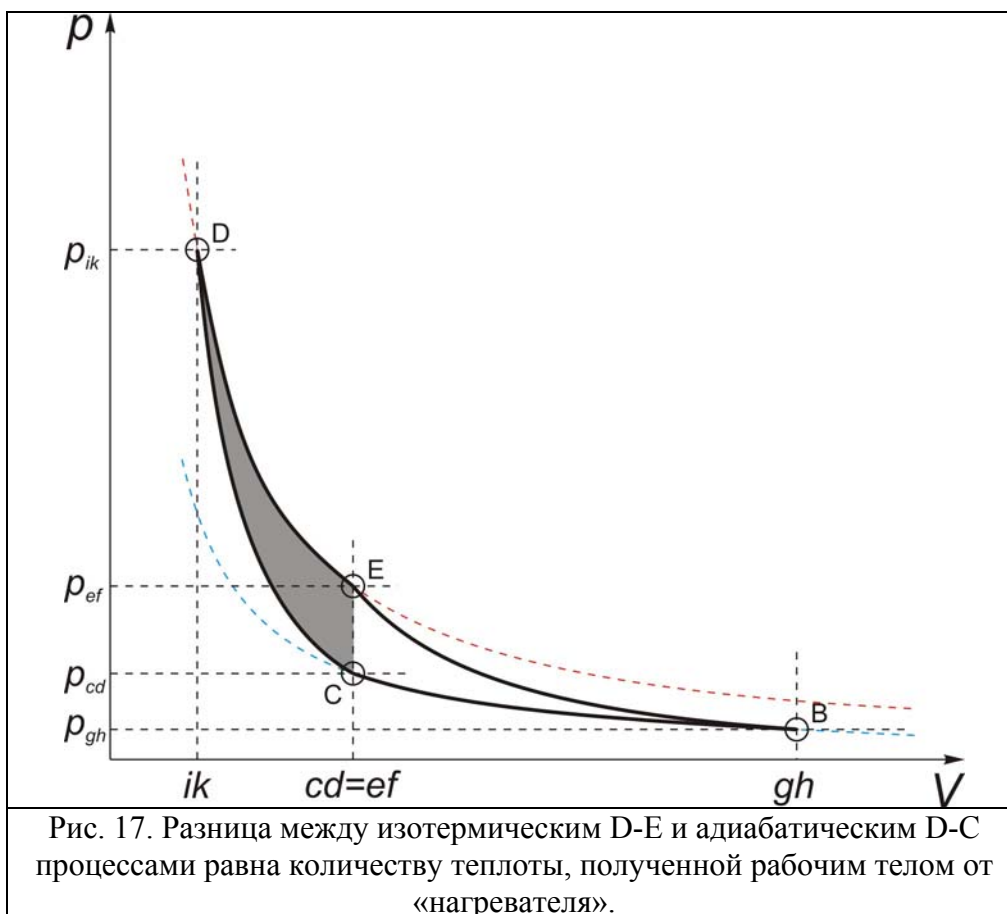
$\int_{ik}^{ef} p_{изотерм.} dV$ – это формула, описывающая работу предварительно сжатого газа при его изотермическом расширении при изменении положения поршня с ik в ef .

$\int_{ik}^{cd} p_{ад.} dV$ – это формула, описывающая работу предварительно сжатого газа при его адиабатическом расширении при изменении положения поршня с ik в $cd=ef$.

Изотермическое расширение газа в соответствии с кривой (изотермой) D-E отличается от адиабатного D-C тем, что при изотермическом расширении газ получает от «нагревателя» некоторое количество теплоты, которое мы ранее обозначили через $Q_{\text{нагр.}}$. Если бы мы позволили рабочему телу во время выполнения работы расширяться из положения ik адиабатически, без этого притока теплоты, мы бы получили адиабату D-C, и не получили бы к конечному итоге никакого «избытка движущей силы». Исключительно в силу притока тепловой энергии к рабочему телу, график изотермы, исходящей из точки D лежит выше графика адиабаты, исходящей из той же точки. Таким образом:

$$\int_{ik}^{ef} p_{\text{изотерм.}} dV = \int_{ik}^{cd} p_{\text{ад.}} dV + |Q_{\text{нагр.}}|, \quad [16]$$

что предельно наглядно видно на рис. 17.

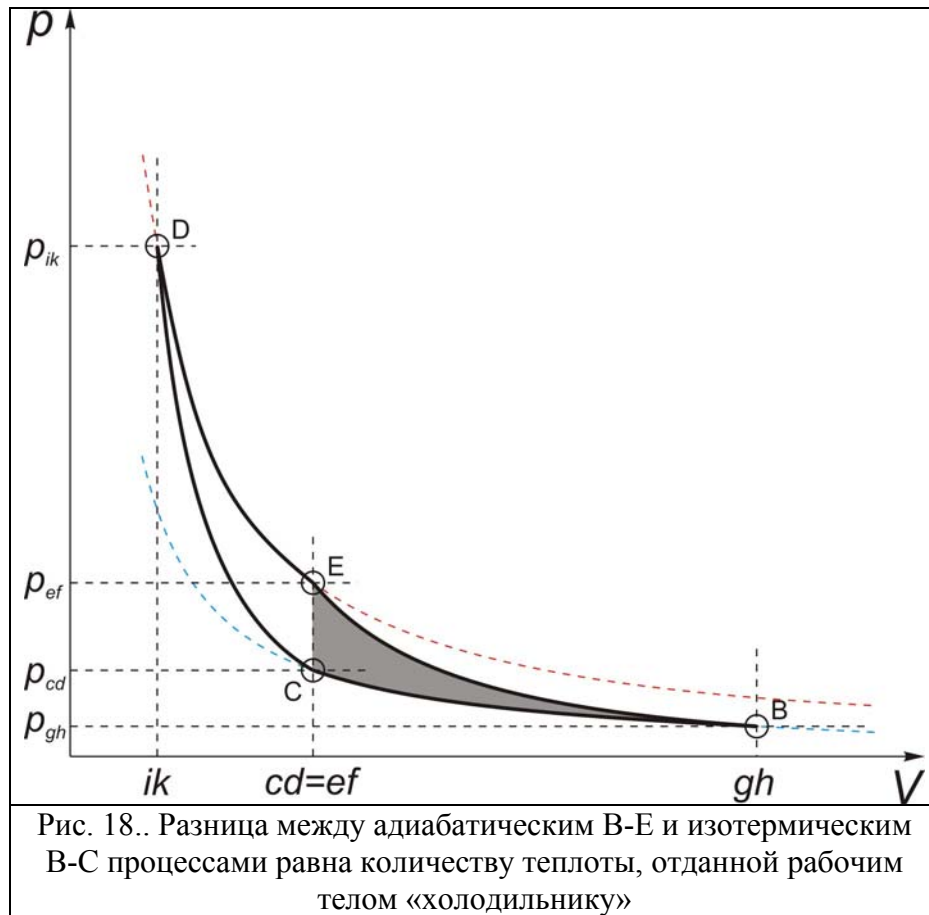


Я помню, что в начале статьи я говорил о том, что подобная запись величины $Q_{\text{нагр.}}$ в виде модуля $|Q_{\text{нагр.}}|$ – бестолковость. Я еще раз повторю, что количество передаваемой тепловой энергии (теплоты) не может быть отрицательным. Но я специально написал именно так, чтобы загодя исключить различные возможные инсинуации в том плане, что «каждому здравомыслящему человеку» давным-давно известно, что «если количество теплоты уменьшается, то надо отнимать» и т.д. Стереотипы мышления на редкость живучи.

Из уравнения [16] следует, что

$$\int_{ik}^{ef} p_{\text{изотерм.}} dV - \int_{ik}^{cd} p_{\text{ад.}} dV = |Q_{\text{нагр.}}|, \quad [17]$$

Теперь давайте посмотрим на разницу третьего и четвертого членов правой части уравнения [15]. Оба графика – адиабата E-B (третий член) и изотерма C-B (четвертый член) сходятся в точке (B) (см. рис. 18):



Подойдем к этим графикам с другой стороны. Допустим, мы поочередно проводим два разных процесса сжатия, один – адиабатно, другой – изотермически, рабочего тела из некоего начального состояния, описываемого точкой (B) на pV -диаграмме рис. 18. Адиабата сжатия В-Е отличается от изотермы сжатия В-С лишь тем, что при адиабатном процессе не происходит передачи тепловой энергии от рабочего тела «холодильнику». То есть, для того, чтобы получить величину «изотермической» работы, надо от «адиабатической» **отнять** некое количество теплоты $Q_{хол}$. Это именно то количество (в соответствии с принципом обратимости термодинамических процессов), которое отнимается от рабочего тела при его сжатии для обеспечения постоянства температуры при первой операции цикла Карно – изотермического сжатия В-С:

$$\int_{gh}^{ef} p_{ад.} (-dV) = \int_{gh}^{cd} p_{изотерм.} (-dV) + |Q_{хол}|, \quad [18]$$

Меняем пределы интегрирования в уравнении [18]:

$$\int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV = \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV + |Q_{хол}|,$$

откуда:

$$\int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV - \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV = |Q_{хол}|. \quad [19]$$

Подставляя выражения [17] и [19] в уравнение [15], получим:

$$A = \int_{ik}^{ef} p_{изотерм.} dV - \int_{ik}^{cd} p_{ад.} dV + \int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV - \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV = |Q_{нагр}| + |Q_{хол}|.$$

То есть, «избыток движущей силы» A , в соответствии с правилами математики для этого, частного случая цикла Карно равен

$$A = |Q_{нагр.}| + |Q_{хол.}|, \quad [20]$$

а вовсе не $A = Q_{нагр.} - |Q_{хол.}|$, «как ожидалось», и как наперебой пытаются убедить студентов и школьников учебники физики и институтские курсы общей физики.

Возможно, кое-кого из читателей смутят мои доводы по выводу уравнения [18]. Хорошо. Давайте посмотрим на графики адиабаты E-B и изотермы сжатия C-B в «правильном направлении», слева – направо.

Работа, выполняемая газом при адиабатном расширении из состояния (E) в состояние (B), равна:

$$A_{EB} = \int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV.$$

Работа, выполняемая газом при изотермическом расширении из состояния (C) в состояние (B), равна:

$$A_{CB} = \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV.$$

Очевидно, что работа, совершаемая газом при адиабатическом расширении E-B, больше, чем работа, совершаемая при изотермическом расширении C-B: $A_{EB} > A_{CB}$, или

$$\int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV > \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV.$$

Мало того, для совершения работы по изотермическому варианту, газу надо было передать некое количество теплоты Q_{CB} (обращаю внимание, что $Q_{CB} \neq Q_{хол.}$), но все равно, выполненная «изотермическая» работа меньше, чем работа «адиабатическая». Почему так? Да потому, что в начале операций, давление газа в «адиабатическом» варианте было выше, чем давление газа при «изотермическом»: $p_{ef} > p_{cd}$.

Для того, чтобы уравнивать начальное давление, необходимо перед «изотермическим» расширением **нагреть** газ – то есть передать ему некое количество теплоты. Это количество теплоты можно определить исходя из следующего рассуждения. Чтобы перевести газ из состояния (C) в состояние (E), газу надо изохорно сообщить такое количество теплоты, чтобы его температура повысилась от температуры T_1 (холодильника) до температуры T_2 (нагревателя). Обозначим необходимое для этого количество теплоты через Q_{CE} . Перейдя в состояние E, газ, при адиабатическом расширении выполнит «адиабатическую» работу. Поэтому можно утверждать, что:

$$\int_{ef}^{gh} p_{ад.} dV = \int_{cd}^{gh} p_{изотерм.} dV + |Q_{CE}|, \quad [21]$$

То есть для того, чтобы уравнивать эти две работы, надо к «изотермической» **прибавить** некую величину.

Сравнивая уравнения [19] и [21], приходим к выводу, что для данного частного варианта цикла Карно:

$$Q_{хол.} = Q_{CE},$$

то есть количество теплоты, которое будет передано «холодильнику» от рабочего тела при его изотермическом сжатии, будет численно равно количеству теплоты, требующейся для изохорного нагревания газа, находящегося при давлении p_{cd} и температуры T_1 до температуры T_2 . При этом давление газа возрастет до p_{ef} .

Продолжая рассуждения в подобном духе, можно прийти к выводу о том, что, для данного частного случая цикла Карно $|Q_{нагр.}| = |Q_{хол.}|$, то есть количество теплоты,

переданной рабочим телом «холодильнику» в начале цикла, равно количеству теплоты, которое рабочему телу необходимо получить при изотермическом расширении для того, чтобы вернуться точно в исходное состояние – с тем же объемом и той же температурой. В этом случае КПД идеального теплового двигателя, вычисленное по формуле [4], лежащей в основе всех «доказательств» теоремы Карно, будет равно 0:

$$\eta_{\max} = \frac{A_{\max}}{W} = \frac{Q_{\text{нагр}} - |Q_{\text{хол}}|}{Q_{\text{нагр}}} = 0.$$

Физический смысл полученного уравнения [20] заключается в том, что количество теплоты, переданной газом (рабочим телом идеального теплового двигателя) при его сжатии «холодильнику», уменьшая величину внешней силы, необходимой для сжатия этого газа из крайнего положения *gh* в крайнее положение *ik* (по сравнению с чисто адиабатным процессом), в конечном итоге **способствует увеличению** «избытка движущей силы», а не уменьшает его. Равно как и количество теплоты, переданной рабочему телу «нагревателем» при изотермическом расширении.

«Но! – воскликнут некоторые. – Что же тогда получается? Неужели же КПД идеального двигателя тогда получается больше единицы?»:

$$\eta = \frac{A}{W} = \frac{|Q_{\text{нагр}}| + |Q_{\text{хол}}|}{|Q_{\text{нагр}}|} = 1 + \frac{|Q_{\text{хол}}|}{|Q_{\text{нагр}}|} > 1$$

Ведь это же абсурд!

Вовсе нет. Как и положено для каждого уважающего себя идеального двигателя, КПД в этом случае равен 1:

$$\eta = \frac{A_{\text{расширения}}}{W_{\text{полная}}} = \frac{\int_{ik}^{ef} p_{\text{изотерм}} dV + \int_{ef}^{gh} p_{\text{ад.}} dV}{\int_{gh}^{cd} p_{\text{изотерм.}} (-dV) + |Q_{\text{хол.}}| + \int_{cd}^{ik} p_{\text{ад.}} (-dV) + |Q_{\text{нагр.}}|} = 1.$$

То есть вся энергия, накопленная в результате сжатия газа (рабочего тела) плюс вся тепловая энергия, своевременно переданная от рабочего тела «холодильнику», а также от «нагревателя» - рабочему телу, пошла на выполнение полезной работы $A_{\text{расширения}}$.

Если вычислить только лишь КПД для работы «избытка рабочей силы» A , то мы получим следующее выражение

$$\eta = \frac{A}{W} = \frac{\int_{ik}^{ef} p_{\text{изотерм}} dV + \int_{ef}^{gh} p_{\text{ад.}} dV - \int_{gh}^{cd} p_{\text{изотерм.}} (-dV) - \int_{cd}^{ik} p_{\text{ад.}} (-dV)}{|Q_{\text{хол.}}| + |Q_{\text{нагр.}}|} = 1.$$

Смущает то, что затраченную на полный цикл Карно энергию я определил как сумму $W = |Q_{\text{нагр.}}| + |Q_{\text{хол.}}|$? Обычный стереотип мышления. Дело в том, что и для нагревания какого-либо тела, и для охлаждения какого-либо тела необходимо затрачивать энергию. Вспомните про бытовые холодильники и кондиционеры. Мы тратим электроэнергию для того, чтобы охладить продукты питания или воздух в помещении.

Как и завещал Сади Карно, во время его цикла мы не произвели ни одного бесполезного перехода теплоты («бесполезного восстановления равновесия теплорода»), – ни при передаче тепла от рабочего тела «холодильнику», ни при приеме тепла от «нагревателя», что, по мнению самого Карно, говорит о том, что «мы употребили» рабочее тело «наиболее выгодным образом». И КПД, равный единице – лишнее тому подтверждение.

Пора переходить к первым выводам. Итак, мы математически грамотно установили, и наглядно, на рисунках 16, 17 и 18 показали, что «избыток рабочей силы», возникающий в идеальном тепловом двигателе при использовании рабочего тела по циклу, предложенным Сади Карно, для некоего частного случая, вовсе не равен разности количеств теплоты, поочередно переданным от «нагревателя» рабочему телу и от рабочего тела – «холодильнику» $A = Q_{нагр.} - |Q_{хол.}|$, так как для рассмотренного нами случая «избыток рабочей силы» равен сумме этих количеств теплоты $A = |Q_{нагр.}| + |Q_{хол.}|$.

Из этого, со всей неумолимостью логики, следует, что все ныне существующие «доказательства» теоремы Карно построены на ложной посылке и не могут являться доказательствами. Поэтому (учитывая все сказанное выше):

ВЫВОД № 1.

Так называемая теорема Карно $\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ неверна.

Почему же возникла эта нелепая, такая, в сущности, детская ошибка, что, якобы $A = Q_{нагр.} - |Q_{хол.}|$? Полагаю, изначально в этом виновата действующая во время Карно теплородная теория теплоты, да и вообще весь тогдашний общий уровень знаний в области физики, прямо сказать, весьма невысокий. Ученые делали самые первые шаги в познании физических законов. И нет ничего удивительного в том, что они ошибались. Добавлю, что широко распространенное ныне мнение о том, будто бы современная теоретическая физика достигла каких-то сказочных высот, тоже ошибочно. Так, во времена реализации Манхэттенского проекта полвека назад, кое-кто из ученых высказывал опасения по поводу возможного распространения ядерной реакции сначала на песок пустыни Невады, а затем и на всю Землю. Было решено построить башню и при поднять ядерную бомбу над песком, но все равно попробовать. Точно так же, никто из нынешних теоретиков от физики не в состоянии предсказать, а чем, собственно, могут закончиться не совсем понятные эксперименты на БАКе – большом адронном коллайдере. Особенно если учесть, что наши взгляды на термодинамику и теплоту заморозились на уровне науки середины XIX века. А эта область знаний все же попроще, чем ядерная физика.

Как я уже говорил, скорее всего, теплота представлялась Сади Карно, как и автору теории теплорода Антуану де Лавуазье, в виде некоего бесцветного газа, без вкуса, без запаха, способного проникать сквозь стенки сосудов и растворяться в любых остальных веществах. «Растворяясь» в газах, теплород вызывает в них «развитие движущей силы», а при выделении теплорода из газа, при «падении теплорода» (по аналогии с водой) «движущая сила» уменьшается. Поэтому, при увеличении температуры газа (а, значит, и содержания теплорода в нем), движущая сила увеличивается – соразмерно с количеством полученного теплорода, а при уменьшении температуры – уменьшается. Увеличилось количество теплорода, который просочился сквозь стенки внутрь цилиндра и нагрел находящийся внутри воздух – значит, надо прибавить, «выдавили» теплород из воздуха внутри цилиндра, опять же сквозь стенки, сжимая газ – значит, надо отнять. Логика, что и говорить, довольно безупречная. Для того времени. В рамках теплородной теории. Но вот дело в том, что подобная логика не вписывается даже в рамки морально устаревшей на сегодня молекулярно-кинетической теории.

Почему этого никто не замечал ляпов в доказательстве теоремы Карно на протяжении последних полутора веков? Конечно, этот вопрос лучше адресовать к Академиям наук. И к нашей, российской, и к зарубежным. На мой же взгляд ответ довольно прост. Дело в том, что из научных учреждений Академии наук потихоньку превращаются в Храмы наук, со всеми вытекающими отсюда последствиями. В храмах – не учатся. Там – молятся. В храмах некогда свежие, но уже давно не соответствующие современным взглядам научные идеи превращаются в догматы. В догматы физической

веры – такие, как теорема Карно. Я не против здорового консерватизма, но когда вся критика новых идей и теорий сводится к негодующим возгласам – «Как? Он посмел покуситься на святое?» На святое – это значит на Эйнштейна, на Ландау, на Ферми, на того же самого Сади Карно...

Скорее всего, эта статья изначально будет принята в штыки учеными, определяющими, что такое «хорошо» и что такое «плохо» в термодинамике и физике вообще. Что ж. Я к этому готов. Это только лишний раз продемонстрирует инерционность человеческого мышления и справедливость «постулата Эйнштейна», вынесенного в эпиграф статьи.

После всего сказанного можно другими глазами взглянуть на другой глобальный вывод Сади Карно. Цитирую его «Размышления...»:

«Невозможность заставить теплород развить большее количество движущей силы, чем мы получили нашей первой серией операций, теперь легко доказать. Она будет доказана рассуждениями, совершенно подобными рассуждениям выше. [Что и говорить, весомое доказательство. Особенно после того, как мы установили, что излишек движущей силы $A = |Q_{нагр.}| + |Q_{хол.}|$, а не $A = Q_{нагр.} - |Q_{хол.}|$] Они здесь даже будут иметь большую точность: воздух, которым мы пользуемся для получения движущей силы, приводится в конце каждого цикла операций точно к прежнему состоянию, в то время как это было не совсем так для водяного пара, что и было отмечено.

Мы выбрали атмосферный воздух как средство для развития движущей силы тепла; очевидно, рассуждения были бы прежние для всякого другого газообразного вещества и даже для всех других тел, способных менять температуру благодаря сжатию и расширению, что охватывает все тела природы или, по крайней мере, все те, которые способны развивать движущую силу тепла. Таким образом мы пришли к следующему общему выводу: Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми, в конечном счете, производится перенос теплорода.»

«Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития...». Ныне этот постулат звучит так: «термический КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела». Так ли это? Давайте разбираться. Для начала вспомним, в каких единицах принято измерять количество теплоты?

Одна, наиболее «древняя» единица – Британская термическая единица, British thermal unit (BTU) – количество тепла, требующееся для поднятия температуры 1 фунта воды на 1°F (градус Фаренгейта). В настоящее время используется в основном как единица измерения энергии для обозначения мощности тепловых установок в США.

Калория – количество теплоты (как принято ныне утверждать, равное количеству работы и энергии), необходимое для нагревания 1 мл воды на 1°C при атмосферном давлении (101,325 кПа). Утверждается, что 1 калория = 4,1868 Джоуля. А Джоуль – это уже абсолютно определенно **единица измерения работы и энергии**. Джоуль равен работе, совершаемой силой в 1 Н (Ньютон) при перемещении точки её приложения, на расстояние одного метра в направлении действия силы.

Как видно, современная термодинамика, основанная на опровергнутой нами теореме Карно, уже чуть ли не навечно уравнила работу, энергию и количество теплоты ($A = E = Q$). И навязала эту идею и в технике, и в других, смежных науках. Но давайте все же, невзирая на то, что этот «факт давным-давно известен всем нормальным людям», так как его проходят в школе, зададимся вопросом, а можно ли приравнивать работу и теплоту, как это повсеместно делается всеми Академиями наук всех без исключения стран мира?

В начале стати я обращал внимание читателей, что использование при доказательстве любой теоремы изотерм, изохор, изобар и адиабат, в соответствии с элементарной логикой, автоматически сужает круг действия таких теорем, ограничивая его исключительно идеальным газом. С определенными допущениями (по температуре, по

давлению) можно расширить действие «доказанной» теоремы на реальные газы. Но распространять область применения на любые агрегатные состояния вещества (то есть на жидкости и твердые тела) – это верх безграмотности. По той простой причине, что изотермы, изохоры, изобары и адиабаты свойственны исключительно газам. Как говорится, что русскому хорошо, то немцу – смерть. Хотя и русский, и немец – люди. То есть, я хочу сказать, что лед, снег, вода и пар, несмотря на то, что их химическая суть одна и та же – H_2O , обладают абсолютно разными физическими свойствами. Равно как и все другие вещества в разных агрегатных состояниях. Это общеизвестно и не раз проверено на практике. Поэтому, с точки зрения элементарной логики, попытка «пристегнуть» выводы, полученные для вещества в одном агрегатном состоянии веществам в другом агрегатном состоянии – полнейший дилетантизм.

Более 200 лет тому назад сэр Бенджамин Томпсон, рейхсграф фон Румфорд, американец по рождению, в свое время воевавший против независимости США на стороне Великобритании, уже в бытность военным министром Баварии, в оружейных мастерских в Мюнхене сделал открытие. Сэр Бенджамин заметил, что при сверлении стволов орудий выделяется большое количество теплоты. Ему даже удалось вскипятить воду, сверля два с половиной часа тупым сверлом металлическую болванку, что несказанно удивило приглашенных на эксперимент.

Сейчас, конечно, вряд ли кто удивится тому факту, что, чем тупее сверло, тем труднее просверлить отверстие, тем большую энергию требуется затратить на сверление и тем сильнее нагревается сверло. Полагаю, многие не раз обжигались, хватаясь за тупое сверло в ручной дрели при попытке заменить его на более острое. И при сверлении отверстий, и при разрезании механическим способом каких-либо предметов, и вообще при любой механической обработке **твердых** предметов при помощи резцов, свёрл или пил, всегда выделяется теплота (тепловая энергия). То есть, когда мы механически обрабатываем одно **твердое** тело другим **твердым** телом, мы имеем дело с трением, и, как следствие, с выделением тепла.

При трении двух твердых тел друг о друга, от этих тел, в основном – от менее прочного тела – откалываются видимые, а также невидимые невооруженным глазом частички. Так, при обработке резцом заготовки на токарном станке, с обрабатываемой детали снимается стружка, потому что обычно резец – прочнее. Резец при этом тупится.

Эффект выделения большого количества тепла при трении с пользой применяется в отрезных машинах, которые в нашей стране по неведомой причине называют «болгарками». При трении быстро вращающегося отрезного диска и стальной детали, сталь сильно разогревается, до красного и даже белого свечения в зоне соприкосновения, межатомные силы при этом существенно уменьшаются и раскаленные частички от обрабатываемой детали отрываются легче, рассыпаясь вокруг огненными искрами.

Преодоление силы трения, будь то сверление отверстия или просто волочение твердого тела по твердому основанию, сводится, в конечном итоге, к разрушению междоменных (как известно, макротела обычно не представляют собой цельного кристалла, а состоят из видимых только в микроскоп доменов - микрокристаллов), межмолекулярных и межатомных связей. Домены «сцеплены» между собой тоже исключительно за счет межмолекулярных и межатомных связей, поэтому, в конечном счете, работа по преодолению силы трения сводится к разрушению межмолекулярных и межатомных связей. Именно при разрушении этих связей и происходит выделение тепловой энергии. Почему происходит выделение тепла – это тема другого долгого разговора. Скажу только, что теоретическое обоснование выделения тепла у меня есть.

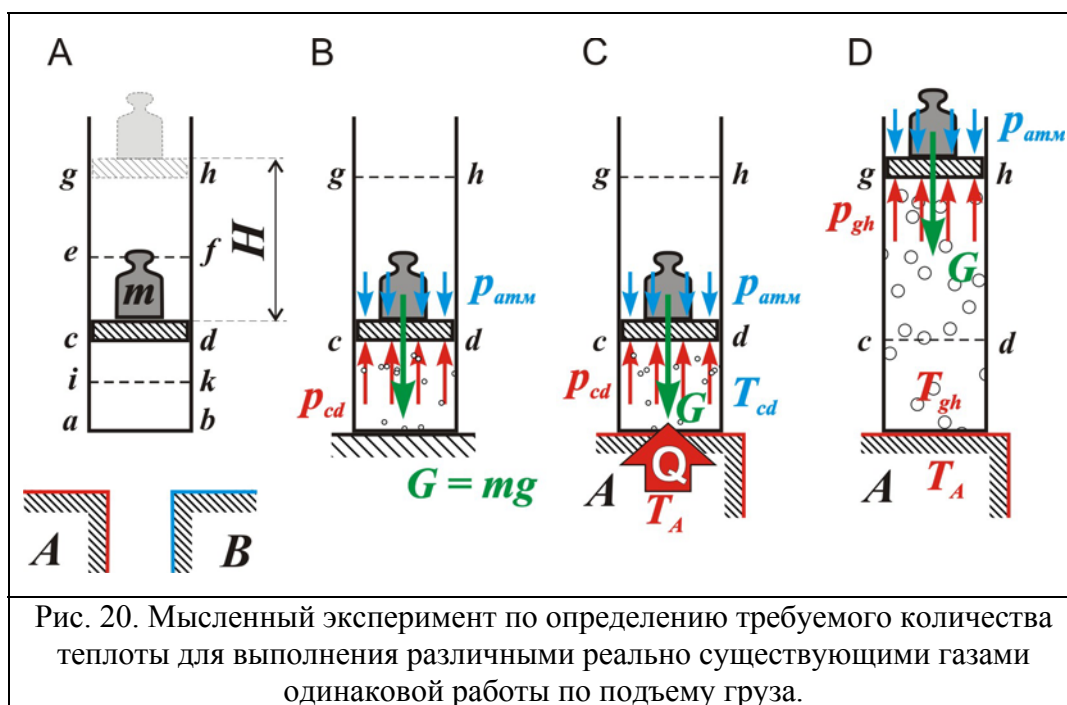
Так как вся работа по преодолению сил трения больше ни на что, кроме как на разрушение межмолекулярных и межатомных связей, не расходуется, то, в соответствии с принципом сохранения энергии, можно утверждать, что вся затраченная на выполнение этой работы механическая энергия перешла в тепловую энергию. Но, что важно, этот вывод касается исключительно **твердых** тел! И он не применим ни для жидкостей, ни для газов. «Газообразные» и «жидкие» молекулы не трутся друг о друга так, как объединенные в кристаллические решетки атомы и ионы.

Поэтому вывод о равенстве работы и теплоты $A = Q$, сделанный на основании опыта по кипячению воды, проведенного сэром Бенджаминном, справедлив исключительно для **твердых** тел, когда работа полностью идет на преодоление силы трения.

В случае с тепловыми **газовыми** двигателями (то есть теми, которые в качестве рабочего тела используют тот или иной газ) мы имеем абсолютно другую картину. Рассмотрим простой пример.

Предположим, что нам необходимо при помощи идеального теплового двигателя выполнить некоторую полезную работу по подъему некоего груза массой m на высоту H (см. рис. 20 А). То есть поднять груз из положения cd в поожение gh . Выполненная полезная работа в этом случае будет равна величине изменения потенциальной энергии этого груза:

$$A_{\text{пол.}} = mgH. \quad [22]$$



Условимся, что работу будем выполнять, используя в качестве рабочего тела различные реально существующие в природе газы, а не виртуальный идеальный газ G_i и исключительно за счет передачи рабочему телу тепловой энергии.

В положении cd груз находится в равновесии (см. рис. 20 В). Уравнение равновесия для груза можно представить так:

$$G + p_{\text{атм}}S = p_{cd}S, \text{ где} \quad [23]$$

G – вес груза,

$p_{\text{атм}}$ – величина атмосферного давления,

p_{cd} – давление газа, заключенного в сосуде $abcd$,

S – площадь поршня.

Если холодный чайник поставить на холодную плиту, ровным счетом ничего не произойдет. Поэтому для того, чтобы при помощи идеального теплового двигателя выполнить работу по подъему груза, мы поставим «холодный» двигатель на **нагреватель** Карно (тело A , имеющее температуру T_A), см. рис. 20 С. Именно нагреватель, без всяких кавычек, так как это тело A будет использоваться нами именно в этом качестве – оно будет нагревать «холодное» рабочее тело внутри двигателя с температурой $T_{cd} < T_A$.

Так как температура нагревателя выше температуры рабочего тела, то будет иметь место процесс теплообмена. Тело A , имеющее температуру T_A , будет передавать теплоту

(тепловую энергию, внутреннюю энергию) рабочему телу идеального двигателя, имеющего более низкую температуру T_{cd} . Температура рабочего тела начнет повышаться, что вызовет увеличение давления внутри цилиндра (в полном соответствии с законом Шарля), и поршень идеального теплового двигателя начнет двигаться вверх, выполняя работу по подъему груза. Допустим, что именно в тот момент, когда поршень достиг положения gh , температура рабочего тела идеального двигателя T_{gh} сравнялась с температурой нагревателя T_A (см. рис. 20 D):

$$T_{gh} = T_A.$$

Уравнение равновесия груза в этом положении будет описываться уравнением:

$$G + p_{амм} S = p_{gh} S. \quad [24]$$

Из сравнения уравнений [23] и [24], следует вывод, что $p_{cd} = p_{gh}$. То есть во время подъема давление внутри идеального рабочего двигателя практически не меняется. А это значит, что весь процесс подъема груза происходит при изобарном расширении газа, выступающего в роли рабочего тела.

Предположим, что в качестве рабочего тела мы поочередно использовали 1 моль каждого газа, приведенного в таблице 1. Предположим, что первоначальная температура рабочего тела $T_{cd} = 400$ К, конечная $T_{gh} = 600$ К. Смотрим таблицу 1.

Таблица 1.

Удельная и молярная изобарная теплоемкость газов c_x при давлении 0,1 МПа, а также количество теплоты, необходимой для выполнения одной и той же работы (т.е. оценка использования этих газов в качестве рабочего тела идеальной тепловой машины.)

Газ	Химическая формула	Молярная масса (грамм)	Молярная теплоемкость (Дж/моль*К), при температуре		Удельная теплоемкость (Дж/кг*К) при температуре		Кол-во теплоты, необходимой для нагрева 1 моля газа с 400К до 600К
			400 К	600 К	400 К	600 К	
азот	N ₂	28,01	29,27	30,11	1045	1075	5938
кислород	O ₂	32,0	30,14	32,10	942	1003	6224
водород	H ₂	2,01	29,10	29,25	14480	14550	5835
неон	Ne	20,18	20,79	20,79	1030	1030	4158
аргон	Ar	39,95	20,81	20,81	521	521	4162
хлор	Cl ₂	70,91	61,62	65,80	869	928	12742
фтор	F ₂	38,0	24,09	24,40	634	642	4849
водяной пар	H ₂ O	18,01	34,16	36,29			7045
углекислый газ	CO ₂	44,0	41,33	47,33			8866

Примечания к таблице:

1. Таблица составлена по данным справочника «Физические величины».
2. Количество теплоты, необходимой для нагревания 1 моля газа с 400 К до 600 К, конечно, следовало бы определять по формуле $Q = \int_{T_0}^{T_2} c_x dT$, но ввиду отсутствия у меня необходимой для этого информации, я определял это количество по формуле $Q = \frac{c_{xT_2} + c_{xT_0}}{2} (T_2 - T_0)$. Ведь, в конце-концов, здесь не требуется астрономическая точность – важно показать тенденцию.

Из последней колонки таблицы 1 видно, что для выполнения одной и той же работы $A_{пол.} = mgH$, при использовании в качестве рабочего тела идеального теплового двигателя разных газов, необходимо передать рабочему телу совершенно разное количество теплоты. Причем существенно разное.

Так, наиболее экономичными являются аргон и неон – им на выполнение работы требуется около 4,16 кДж тепловой энергии, (а, вернее, 0,99 килокалории теплоты), азот, кислород и водород, с показателями от 5,84 до 6,22 кДж тепловой энергии занимают места в середнячках, весьма неэффективны водяной пар и углекислый газ, а абсолютный рекордсмен по растраниванию тепла – хлор – 12,74 кДж. То есть, для выполнения той же самой работы «хлорному» идеальному тепловому двигателю надо передать в три раза больше тепла, чем «аргонному». Надеюсь, я наглядно продемонстрировал, что КПД теплового двигателя весьма существенно зависит от природы рабочего тела?

Анализ этой ситуации приводит к следующему выводу. Полезная работа, выполняемая идеальным тепловым газовым двигателем, пропорциональна количеству теплоты, переданному рабочему телу этого двигателя от нагревателя:

$$A_{пол.} = k \times f(Q), \text{ где}$$

k – некий коэффициент пропорциональности, прямо пропорциональный молярной изобарной теплоемкости газов c_x . Самая большая величина этого коэффициента для приведенных в таблице газов – у гелия (He), самая низкая – у хлора (Cl₂). И вот именно этот коэффициент k , на мой взгляд, гораздо больше заслуживает наименования **термодинамический коэффициент полезного действия** того или иного газа, чем выведенный по ложной, как мы ранее убедились, формуле $\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

В определенных пределах, когда состояния реальных газов изменяется близко к идеальным газовым законам Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, то можно считать $A_{пол.} = kQ$. Полагаю, точности этой формулы вполне хватит для решения большинства технических задач. Надо только экспериментальным путем определить значения коэффициента k .

Чтобы убедиться в этих выводах, можно провести натурный эксперимент, стоимость проведения которого, по моим подсчетам, не превысит 300 000 рублей (полагаю, можно уменьшить расходы раз в 10-15, но существенно вырастет погрешность результатов). Это я к чему говорю – для изучения физики зачастую не надо строить большой адронный коллайдер. Провести такой эксперимент, при наличии средств, не составит большого труда в любом высшем учебном заведении или даже в средней школе.

Таким образом, мы нашли опровержение еще двум старинным заблуждениям:

1. *о том, что якобы работа газа в идеальном тепловом двигателе равна полученной от нагревателя теплоте $A = Q$,*

2. *и о том, что якобы «движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития», или, как это принято формулировать ныне, что «термический КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела».*

ВЫВОД № 2.

На самом деле работа газа лишь прямо пропорциональна количеству полученной теплоты $A_{пол.} = k \times f(Q)$. При этом количество полезной работы, которую способен выполнить взятый в качестве рабочего тела газ, непосредственно зависит от его свойств, в первую очередь – от его молярной теплоемкости.

Коэффициент пропорциональности имеет полное право называться «термодинамическим коэффициентом полезного действия» газа.

На закуску, в свете вновь полученного знания, предлагаю, что называется «с пристрастием» почитать про цикл Карно и тепловые машины в «наиболее свежих» учебниках.

Начнем с книги *К.В. Глаголева и А.Н. Морозова «Физическая термодинамика»*. Цитируемый по книге текст выделен курсивом, мои комментарии – обычным шрифтом:

«Сейчас разработано большое количество разнообразных тепловых машин, в которых реализованы различные термодинамические циклы. Тепловыми машинами являются двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, различные тепловые турбины и т.д.

Тепловые машины или тепловые двигатели предназначены для получения полезной работы за счет теплоты, выделяемой вследствие химических реакций (сгорание топлива), ядерных превращений или по другим причинам (например, вследствие нагрева солнечными лучами). На рис. 21 А приведена условная схема тепловой машины, а рис. 21 Б иллюстрирует ее термодинамический цикл.»

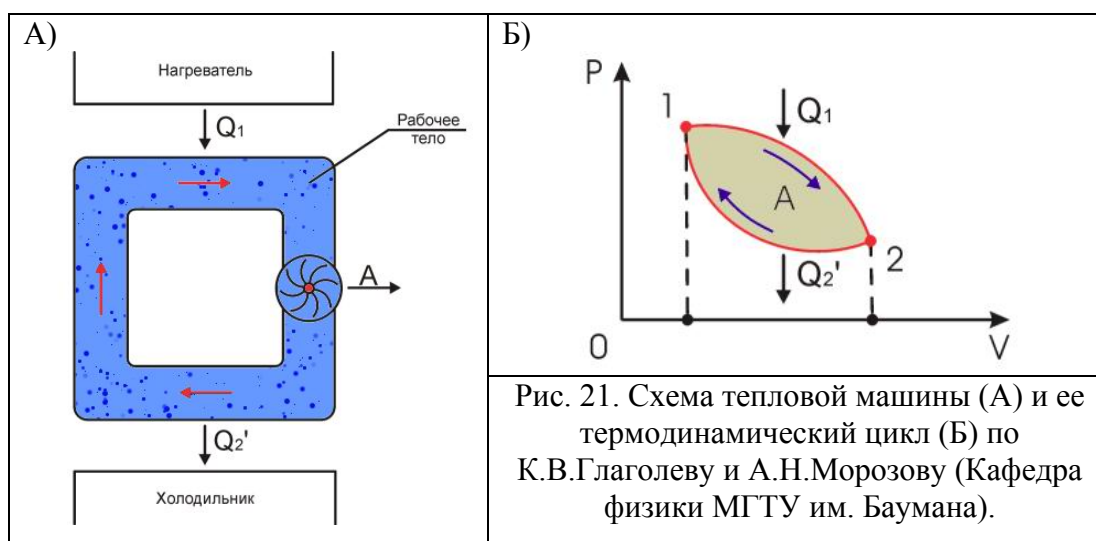


Рис. 21. Схема тепловой машины (А) и ее термодинамический цикл (Б) по К.В.Глаголеву и А.Н.Морозову (Кафедра физики МГТУ им. Баумана).

Интересно, а почему вдруг движение рабочего тела показано по часовой стрелке? Неужели Морозов и Глаголев отыскиали таки демон Максвелла и сумели его встроить в рабочий орган своей тепловой машины? А как иначе объяснить такой вот круговорот? У меня есть только два варианта. Либо К.В. Глаголев и А.Н. Морозов втихомолку изготовили вечный двигатель, но никому об этом не сказали, либо нашли-таки и умело приспособили этого самого демона.

«Для функционирования тепловой машины обязательно необходимы следующие составляющие: нагреватель, холодильник и рабочее тело. При этом, если необходимость в наличии нагревателя и рабочего тела обычно не вызывает сомнений, то холодильник как составная часть тепловой машины в её конструкции зачастую отсутствует. В качестве холодильника выступает окружающая среда.»

Авторам невдомек, что «холодильник» для работы тепловой машины необходим лишь в том случае, если рабочий цикл этой машины – замкнутый. Все же разнообразные существующие тепловые машины – и двигатели внутреннего сгорания (ДВС), и реактивные двигатели, и паровые и газовые турбины – работают по незамкнутому циклу. После каждого цикла в ДВС отработавшее свой цикл рабочее тело безжалостно выбрасывается в атмосферу Земли. Атмосфера Земли в этом случае вовсе не выступает в роли холодильника. Например, паровой двигатель Уатта вполне может работать, даже в случае, когда температура окружающего воздуха выше, чем температура пара в котле. Самое главное для работы поршневых двигателей – чтобы **давление** окружающего воздуха не превышало давления **отработавшего** рабочего тела (пара в паровой машине или сгоревшей рабочей смеси в ДВС).

А насчет того, что реактивные двигатели и турбины работают по какому-то термодинамическому циклу, у меня вообще имеются очень большие сомнения. Дело в том, что работа этих двигателей вообще не циклична. Цикл свойственнее лишь поршневым машинам. Продолжим:

*«Принцип действия тепловых машин заключается в следующем. Нагреватель передает рабочему телу теплоту Q_1 , вызывая повышение его температуры. Рабочее тело совершает работу A над каким-либо механическим устройством, например, приводит во вращение турбину, и далее отдает холодильнику теплоту Q_2' , возвращаясь в исходное состояние. Величина $Q_2 = -Q_2'$ представляет собой количество теплоты, передаваемое холодильником рабочему телу, и имеет **отрицательное** значение.»*

Отметим, что мысль о том, что нагреватель передает теплоту рабочему телу, **«вызывая повышение его температуры»** – это правильная мысль. Именно так работали паровые машины Севэри, Ньюкомена и Уатта. Но вот дальше. Какая разница, в какую сторону передается теплота? Количество теплоты не может быть отрицательным, так как это – **количество!** Но самое ужасное – это **«количество теплоты, передаваемое холодильником рабочему телу»**. Холодильник передавать рабочему телу теплоту не может!!! Так как он – холодильник!!! Он может только принимать от рабочего тела теплоту. И это преподают студентам в довольно престижном вузе. Ох уж мне эти физико-математики...

«Отметим, что наличие холодильника и передача ему части полученной от нагревателя теплоты, является обязательным, так как иначе работа тепловой машины невозможна. Действительно, для получения механической работы необходимо наличие потока, в данном случае потока теплоты. Если же холодильник будет отсутствовать, то рабочее тело неизбежно придет в тепловое равновесие с нагревателем, и поток теплоты прекратится.»

Отметим, что наличие холодильника не является обязательным для работы реальной тепловой машины. Еще раз объясню, что обязательным для работы любой тепловой машины является, в полном соответствии с законами механики Ньютона, наличие разности давлений по разные стороны рабочего органа (поршня, лопатки турбины, между камерой сгорания в реактивном двигателе и атмосферой). Именно наличие этой разницы давлений приводит к поступательному движению поршня, вращению ротора турбины или созданию реактивной тяги.

Это заблуждение является следствием того, что в свое время Джеймс Уатт провел, скажем так, первую серьезную модернизацию «огневой машины» Томаса Ньюкомена. «Огневая машина» Ньюкомена, по сути, являлась атмосферным двигателем, так как основной рабочий ход во время рабочего цикла выполнялся за счет атмосферного давления. В момент наибольшего подъема поршня внутрь рабочего цилиндра впрыскивалась холодная вода. Пар конденсировался, образовывался вакуум, и поршень, под действием внешнего атмосферного давления, «втягивался» в цилиндр, приводя через коромысло в движение поршень водяного насоса. Почти столетие паровые машины применялись исключительно для одной цели – откачки воды из шахт и осушения территорий.

Для того, чтобы повысить эффективность ньюкоменовского двигателя, Уатт решил не конденсировать пар в рабочем цилиндре, так как это остужало рабочий цилиндр и приводило к существенным потерям тепловой энергии, а придумал для этой цели отдельный «конденсор» – холодильник. Это изобретение позволило ему сразу же почти вдвое превзойти эффективность паровых машин. Эффективность тогда оценивалась количеством поднятых футо-фунтов воды на один бушель угля, сожженного в топке бойлера паровой машины.

Кстати, ни двигатель Ньюкомена, ни двигатель Уатта тоже не работали по замкнутому циклу. В более современных паровых машинах холодильник вообще никогда не применялся – отработанный пар в конце каждого цикла просто-напросто выбрасывался в атмосферу. Идея, будто бы атмосфера работает как холодильник – полная чушь.

«В соответствии с первым началом термодинамики, при осуществлении кругового процесса, из-за возвращения рабочего тела в исходное состояние, его внутренняя энергия за цикл не изменяется. Поэтому совершенная рабочим телом механическая работа равна разности подведенной и отведенной теплоты:

$$A = Q_1 - Q_2'.$$

Тепловой коэффициент полезного действия (к.п.д.) цикла любой тепловой машины можно рассчитать как отношение полезной работы A к количеству теплоты Q_1 , переданной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} \gg$$

Как мы установили, для реальных тепловых двигателей, использующих в качестве рабочего тела реально существующие газы, нельзя уравнивать теплоту и работу. Это выражение неверно, так как приравнивание теплоты к работе для тепловых двигателей изначально ложно. Можно лишь говорить о том, что $A_{\text{газового_теплового_двигателя}} = kQ_1$.

Аналогичным образом обстоит дело и за рубежом. Не так давно, а именно в начале 2007 года в издательстве «Geleos» была издана переведенная на русский язык книга «The nature of science: An A-Z guide to the laws and principles governing our universe by James S. Trefil (2003)». В русском переводе она называется так: Джеймс Трефил, «Природа науки. 200 законов мироздания». Также она доступна на сайте www.elements.ru.

Кто такой этот Джеймс Трефил (James S. Trefil)? Как нас уверяет издатель, это широко известный американский ученый, член Американского физического общества, член Американской ассоциации по развитию науки и Всемирного экономического форума. Он является автором более 30 научно-популярных книг и **специального учебного курса, который используется более чем в 200 американских колледжах и университетах** [выделено мной – в качестве информации к размышлению]. В 2000 году Трефил стал лауреатом премии Andrew Gemant Award, которая присуждается Американским институтом физики за существенный вклад в развитие и популяризацию науки.

Родился Джеймс Трефил в 1938 году в Чикаго. В 1966 году в Станфордском университете защитил кандидатскую по физике. Преподавал в университетах Иллинойса и Вирджинии. С 1988 года работает профессором физики в Университете Джорджа Мэйсона. Долгое время занимался теоретической физикой, но затем, по его собственным словам, решил доступным языком рассказать о научных знаниях широкому кругу людей. В журнале Смитсоновского института и на страницах ежемесячного издания Astronomy было опубликовано более 100 научных статей Трефила. Кроме того, он регулярно выступает на Национальном государственном радио США.

Вот что профессор Джеймс Трефил говорит по поводу этой, одной из последних своих книг: - *«Законы природы - скелет Вселенной. Они служат ей опорой, придают форму, связывают воедино. Вместе они воплощают в себе величественную картину нашего мира. Они делают нашу Вселенную познаваемой, подвластной силе человеческого разума. В эпоху, когда мы перестаем верить в свою способность управлять окружающими вещами, они не дают забыть: даже самые сложные системы повинуются простым законам, понятным обычному человеку...»*. «...Улучшая качество нашей жизни, наука в то же время открывает для нашего интеллекта великолепное окно во Вселенную. Она показывает нам, что весь окружающий нас мир существует по общим правилам и принципам, и эти правила и принципы можно обнаружить с помощью научных методов».

Красиво сказано. Бесподобно. А теперь давайте вместе откроем книгу, которая, как уверяет издатель, является «самой современной научной энциклопедией в мире» в том месте, где описывается цикл Карно. Итак, цитирую, как обычно, текст из книги выделен курсивом, мои комментарии – обычным шрифтом:

«ЦИКЛ КАРНО.

Идеальных машин в реальной жизни не существует, это всего лишь мысленный конструкт...»

Уважаемый читатель, простите меня. Но это придумал не я. Я тоже некоторое время сидел, тупо глядя в окружающее пространство, и соображал, что же это за зверь такой – «**мысленный конструкт**»? Потом я догадался, что переводчик имел в виду «**воображаемый образ**» или что-то вроде того.

«...Каждая из таких гипотетических машин, среди которых двигатель Карно занимает немаловажное место, иллюстрирует какое-нибудь важное теоретическое заключение. (Даже воздушный замок под названием вечный двигатель служит, по сути, лишь для того, чтобы показать: нельзя получать энергию из ничего.) Двигатель Карно, лежащий в основе работы идеального теплового двигателя, был придуман французским инженером Сади Карно за двадцать лет до того, как были сформулированы основы термодинамики, однако он иллюстрирует важное следствие из второго начала термодинамики.»

Я всегда наивно полагал, что двигатель Карно – это и есть идеальный тепловой двигатель. А Вы? И мне непонятно, как двигатель Карно может лежать в основе работы идеального теплового двигателя? Это – самое настоящее масло масляное. Вот, например, фраза «цикл Карно, который лежит в основе работы идеального теплового двигателя» у меня бы недоумения не вызвала. Поэтому, прочитав этот первый абзац, я понял, что необходимо разыскать первоисточник. Может, профессор Трефил, популяризатор науки, автор 30 научно-популярных книг и специального курса для американских студентов, писал что-то совсем другое, а во всех «косяках» виноват исключительно доблестный российский переводчик, явно обладающий незаурядным «мысленным конструктом»? Оригинал я нашел. И понял, что и переводчик внес свою лепту в этот наукообразный труд, и сам профессор Джеймс Трефил тоже «не подкачал». Чтобы предоставить читателю возможность проверить мои выводы, я приведу соответствующие русскому переводу отрывки из книги Трефила на английском языке:

Some of the most important machines don't actually exist, or at least they do so only as mental constructs. Each of these hypothetical machines, among which the *Carnot engine* holds an important place, illustrates an important point. (Even the castle in the sky that is the PERPETUAL-MOTION machine serves to show that you can't get something for nothing.) The Carnot engine, a concept developed by Sadi Carnot, underlines an important consequence of the second law of THERMODYNAMICS.

Как видно, Джеймс Трефил ни слова не сказал о том, что «двигатель Карно лежит в основе работы идеального теплового двигателя». Он высказался в том плане, что «двигатель Карно, концепцию которого разработал Сади Карно, подчеркивает важное следствие второго закона термодинамики.» Зато дальше Трефил написал следующее:

The main working part of the Carnot engine can be thought of as a piston in a gas-filled cylinder. As befits the theoretical nature of the engine, the piston operates without friction and suffers from no imperfection. The piston can move back and forth between two reservoirs of heat, one at a high temperature, the other at a low temperature. (Think of the high temperature as being produced by a burning mixture of gasoline and air, and the low temperature as associated with the surrounding atmosphere.) The engine then goes through a cycle as follows:

Вот издательский перевод:

«Рабочую часть двигателя Карно можно представить себе в виде поршня в заполненном газом цилиндре. Поскольку двигатель Карно – машина чисто теоретическая, то есть идеальная, силы трения между поршнем и цилиндром и тепловые потери считаются равными нулю. Поршень может свободно перемещаться между двумя тепловыми резервуарами – с высокой температурой и с низкой температурой. (Для удобства представим, что горячий тепловой резервуар нагревается посредством сжигания смеси бензина с воздухом, а холодный – остужается водой или

воздухом комнатной температуры.) В этой тепловой машине происходит следующий идеальный четырехфазный цикл: ...»

И вот тут-то начинается самое интересное! Особо выдающиеся мысли я выделил укрупненным шрифтом и подчеркиванием.

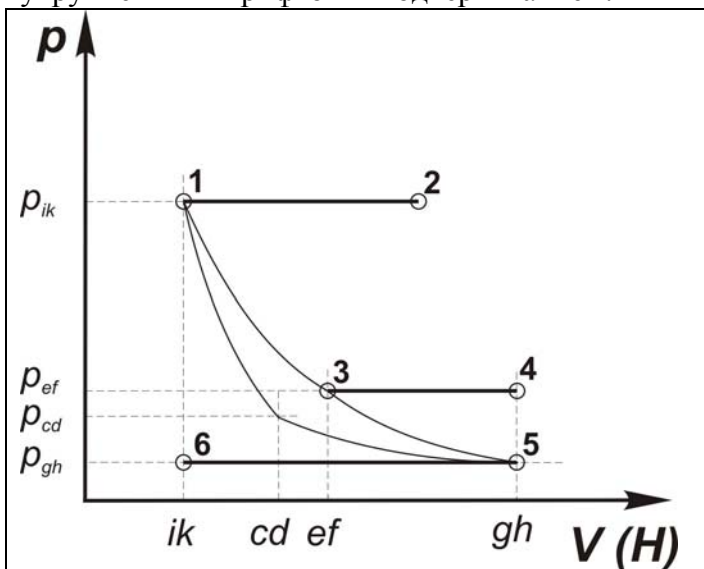


Рис. 22. Например, так – прямые (1-2), (3-4), и (5-6) в p - V координатах **обязаны** выглядеть термодинамические процессы, проходящие «**при постоянном давлении**». Для сравнения тонкими линиями показан «канонический» цикл Карно.

«1. Сначала цилиндр вступает в контакт с горячим резервуаром, и идеальный газ расширяется **при постоянной температуре и постоянном давлении**. На этой фазе газ получает от горячего резервуара некое количество тепла.»

Идеальный газ расширяется при постоянном давлении. Это – новое слово при интерпретации цикла Карно. А теперь посмотрим на рисунок 22. Дело в том, что любые процессы, если они происходят при постоянном давлении газа, должны выглядеть на pV -диаграмме как прямые, параллельные оси абсцисс. И никак иначе. В истинном, каноническом, цикле Карно давление же меняется постоянно.

А то, что американский профессор написал, что газ якобы «**расширяется и при постоянной**

температуре и при постоянном давлении», вообще повергает в шок. Интересно, что бы сказали по этому поводу господи Роберт Бойль, Жозеф Луи Гей-Люссак, Жак Шарль и монах Эдм Мариотт?

«2. Затем цилиндр окружается идеальной теплоизоляцией, за счет чего количество тепла, имеющееся у газа, сохраняется, и газ продолжает расширяться, пока его температура не упадет до температуры холодного теплового резервуара.

3. На третьей фазе теплоизоляция снимается, и газ в цилиндре, будучи в контакте с холодным резервуаром, сжимается, отдавая при этом часть тепла холодному резервуару.

4. Когда сжатие достигает определенной точки, цилиндр снова окружается теплоизоляцией, и **газ сжимается за счет поднятия поршня** и цикл повторяется вновь с первой фазы.»

Если мы посмотрим на «каноническое» представление цикла Карно (например на рис. 1), то легко убедимся, что при поднятии поршня газ РАСШИРЯЕТСЯ, так как объем, занимаемый газом, увеличивается. Проверяем перевод по оригиналу:

«1 The cylinder is first in contact with the high-temperature reservoir, and the gas in the cylinder is allowed to expand, always staying **at the same temperature and pressure**. During this stage, heat flows into the gas from the high-temperature reservoir.

2 The cylinder is then wrapped in insulation, so that no heat can enter or escape, and the gas is allowed to continue to expand until it reaches the temperature of the low-temperature reservoir.

3 The insulation is removed, and the gas in the cylinder, now in contact with the low-temperature reservoir, contracts, transferring some heat to the low-temperature reservoir as it does so.

4 When the contraction has reached the proper point, the cylinder is again wrapped in insulation and **the gas is compressed by moving the piston up**. This

continues until the temperature of the gas has risen to that of the high-temperature reservoir; the insulation is then removed and the cycle is repeated from stage 1.»

Выходит, именно то, как это написано в переводе, американский профессор физики и имел в виду! После этого и профессор и переводчик дали полную волю своей фантазии:

This engine has many of the characteristics of real engines: it runs on a cycle (in this case known, not surprisingly, as the *Carnot cycle*), it extracts energy from a high-temperature process (such as the burning of a fuel), and **it dumps some of that energy into the surrounding environment**. In the process, **it does some work (in the case of the Carnot engine, by pushing the piston down)**. The efficiency of the Carnot engine, the *Carnot efficiency*, is defined to be the work it does divided by the energy (in the form of heat) it removes from the hot reservoir. It is easy to prove that this efficiency, E , is given by the formula.

Вот перевод:

«Двигатель Карно имеет много общего с реальными двигателями...»

Очень интересно. Я бы даже сказал, интригующе... Вообще-то все более-менее грамотные физики в один голос утверждают, что двигатель Карно – исключительно теоретический двигатель, который никогда не будет воплощен, что называется, «в железе».

«...- он работает по замкнутому циклу (который называется, соответственно, циклом Карно)...»

Цикл Карно – исключительно теоретический цикл и до сих пор не реализован ни в одном ни в одном реальном тепловом двигателе. Ни один реальный тепловой двигатель не работает по циклу Карно. И вряд ли когда-нибудь будет. Скажу даже больше. Практически никакой реальный двигатель не работал, не работает и вряд ли будет работать по ЗАМКНУТОМУ циклу. У всех реальных тепловых двигателей по завершении цикла отработанное рабочее тело попросту выбрасывается, обычно – в атмосферу. Поэтому все реальные тепловые двигатели работают по НЕЗАМКНУТОМУ циклу. Но этот ляп следует засчитать переводчику, а не профессора. Профессор не конкретизировал цикл, а высказался просто: «it runs on a cycle».

«...- он получает энергию извне благодаря высокотемпературному процессу (например, при сжигании топлива);

- часть энергии рассеивается в окружающую среду...»

Вот это новость, так новость! Идеальный тепловой двигатель Карно, в окружающую среду как раз не имеет права рассеивать часть энергии в окружающую среду! Так как он – ИДЕАЛЬНЫЙ!!! А идеальный двигатель тем и отличается, что производит теплообмен исключительно с тепловыми резервуарами – нагревателем и холодильником, но никак не с окружающей средой. Вспомним слова Сади Карно по поводу «бесполезного восстановления равновесия теплорода» – это как раз насчет бесполезного разбазаривания теплоты в окружающую среду.

«...При этом производится определенная работа (в случае двигателя Карно – за счет поступательного движения поршня).

КПД, или эффективность двигателя Карно определяется как отношение работы, которую он производит, к энергии (в форме тепла), отнятой у горячего резервуара. Нетрудно доказать, что эффективность (E) выражается формулой:

$$E = 1 - \frac{T_c}{T_h}.$$

где T_c и T_h – соответственно температура холодного и горячего резервуаров (в кельвинах).»

Я так понимаю, T_c и T_h – это от слов «cool» и «hot»? Почему бы переводчику не написать T_x и T_y - от слов «холодный» и «горячий» или, как принято в нашей литературе T_1 и T_2 ? Ну да ладно... СТОП! Что мы видим? Оказывается, переводчик немного подправил профессора Трефила, который написал следующее: ***«it does some work (in the case of the Carnot engine, by pushing the piston down)»***, то есть – в двигателе Карно

работа совершается при движении поршня вниз. О как! Да... Что и говорить. Блестящий пример того, как следует «доступным языком рассказывать о научных знаниях широкому кругу людей.»

Продолжать дальше не вижу смысла. Жаль, что среди многих книг уважаемое издательство «Geleos» вдруг перевело и напечатало в России книгу самого что ни на есть профана от науки, несмотря на все его почетные звания и премии. Да еще и переводчика подобрало с незаурядным *мысленным конструктом*.

Подведем **ИТОГИ**:

1. *Так называемая теорема Карно $\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ неверна.*

2. *Работа газа в тепловом газовом двигателе прямо пропорциональна количеству полученной теплоты $A_{газа} = k \times f(Q)$. При этом количество полезной работы, которую способен выполнить взятый в качестве рабочего тела газ, непосредственно зависит от его свойств, в первую очередь – от его молярной теплоемкости.*

Чем раньше эти факты будут доведены до сознания людей, в первую очередь – до сознания физиков-теоретиков, преподавателей вузов и школьных учителей, тем лучше. Физика, в первую очередь – сугубо практическая наука, цель которой – познание принципов и законов мироустройства и использование этих принципов и законов с пользой для людей и человечества в целом. Недаром изначально она называлась «Экспериментальная философия». Практика и теория должны составлять единое целое. В случае же с теоремой Карно инженеры не раз убеждались в том, что физическая теория вступала в прямой конфликт с практикой. И это не единичный пример. К сожалению, к настоящему времени физика из практической науки превращается в виртуальную. Настало время трезво, более критично оценить основные существующие физические теории – не только в области термодинамики, и, что называется, отделить зерна от плевел. Аналогичный подход должен быть и в методике преподавания физики.

В первую очередь необходимо убрать цикл и теорему Карно из школьных учебников. Так как школьные учебники – квинэссенция знаний человечества. В них отражены **базовые знания** человечества. Базовые знания, которые формируют мировоззрения и философские взгляды каждого индивидуума в отдельности и во многом определяют дальнейшее развитие всего человечества.

Я уважаю всех ученых, которые внесли свой вклад в науку, но наплевательское отношение к науке, как, например, у профессора Джеймса Трефила, мне противно. Возможно, я был не совсем тактичен, указывая на ошибки в теориях, учебниках и курсах лекций – *mea culpa*, поэтому прошу прощения за излишнюю резкость слов, но для настоящего ученого истина должна быть дороже обид.

Дубровский П.И.

© 2008-2010, Санкт-Петербург

Список использованной литературы.

[1]. *Clapeyron E.* Puissance motrice de la chaleur, *Journal de l'École Royale Polytechnique*, Vingt-troisième cahier, Tome XIV, p.p.153-190 (1834),

[2]. «Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance, par *S. Carnot*, ancien élève de l'École Polytechnique», Paris, Gautier-Villars, Imprimeur-Libraire, 1878.

Перевод: *Карно Никола Леонар Сади*. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. Перевод В.Р. Бурсиана и Ю.А. Круткова.

(<http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1165074&uri=page1.html> –
<http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1165074&uri=page12.html>)

- [3]. *James S. Trefl* The Nature of Science: An A-Z Guide to the Laws and Principles Governing Our Universe. Издательство Houghton Mifflin Harcourt, 2003 (433 стр.)
Перевод – www.elementy.ru
- [4]. *Базаров И.П.* Термодинамика. Москва, Издательство «Высшая школа», 1991 г, 376стр.
- [5]. *Глаголев К.В., Морозов А.Н.* Физическая термодинамика. Москва: Издательство МГТУ им Н.Э.Баумана, 2004 г.
- [6]. *Громов С.В.* Физика. Оптика, тепловые явления, строение и свойства вещества. Учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений. Под редакцией Н.В. Шароновой. Допущено Министерством образования Российской Федерации. 6-е издание. Москва, «Просвещение», 2005.
- [7]. *Касьянов В.А.* Физика. 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации. 7-е издание, доработанное. Москва, «Дрофа», 2005.
- [8]. *Кикоин А.К., Кикоин И.К.* Общий курс физики. Молекулярная физика. Издание второе, переработанное. Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов физических специальностей высших учебных заведений. Москва, издательство «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1976.
- [9]. *Кудрявцев Б.Б.* . Курс физики. Теплота и молекулярная физика. Издание второе. Москва, Издательство «Просвещение», 1965 г.
- [10]. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Часть 1. Издание 3-е, дополненное Е.М. Лившицем и Л.П. Питаевским. Москва, Издательство «Наука», 1977 г.
- [11]. *Ландау Л.Д., А.И. Ахиезер, Лифшиц Е.М.* Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. Издание 2-е, исправленное. Москва. Издательство «Наука», 1969 г. 399 с.
- [12]. *Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н.,* Физика: учебник для 10 класса, Под редакцией проф. В.И. Николаева и проф. Н.А. Парфентьевой. Рекомендован Министерством образования и науки Российской Федерации. 17-е изд., Москва, издательство «Просвещение», 2008 г.
- [13]. *Перельман Я.И.* Занимательная алгебра Издание четвертое, пересмотренное и исправленное. Москва, Ленинград, Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1949.
- [14]. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Том II. Термодинамика и молекулярная физика. Москва, Издательство «Наука», 1975 г
- [15]. Д. Тер Хаар, Г. Вергеланд. Элементарная термодинамика. Перевод с английского И. Б. Виханского. Под редакцией Н.М. Плакиды. Издательство «Мир», Москва, 1968 (D. TER HAAR, Oxford University, H. WERGELAND, Norwegian Institute of Technology, Trondheim. ELEMENTS OF THERMODYNAMICS. Addison-Wesley Publishing Company).
- [16]. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндз М.* Фейнмановские лекции по физике. 3. Излучение, волны, кванты, 4. Кинетика, теплота, звук. Москва, Издательство «Мир», 1977 г.
- [17]. Физические величины: Справочник. *А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.*; Под. ред. *И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова.* - М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 стр.
- [18] Толковый словарь русского языка: В 4 томах. Под редакцией *Д.Н. Ушакова.* Государственный институт «Советская энциклопедия», ОГИЗ, Государственное издательство иностранных и национальных словарей, Москва, 1935-1940.
- [19]. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. Для студентов и инженеров вузов. Издание седьмое, исправленное. Москва, Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1979 г.