

## Сади Карно и второе начало термодинамики

Дж. Сринисаван (Индия)

Перевод М.Х. Шульмана ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru))

---

### Sadi Carnot and the Second Law of Thermodynamics

**J. Srinivasan**

Professor both at Centre for Atmospheric and Oceanic Sciences and Department of Mechanical Engineering at Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India.

E-mail: [jays@caos.iisc.ernet.in](mailto:jays@caos.iisc.ernet.in)

RESONANCE | November 2001

<http://www.ias.ac.in/resonance/Nov2001/pdf/Nov2001p42-48.pdf>

---

Второе начало термодинамики является одним из самых загадочных законов физики. Сади Карно, французский инженер, сыграл важную роль в его открытии в 19-м веке. Здесь рассказывается, как он предложил основные положения этого закона, хотя и не полностью понимал первое начало термодинамики.

### Введение

Главной революцией в физике 19 века было открытие двух законов термодинамики. Последняя занимается взаимодействием энергии и материи. Первое начало утверждает, что энергия не может ни возникать, ни уничтожаться. Оно установило эквивалентность тепла и работы при взаимодействиях. Второе начало термодинамики утверждает, что невозможно полностью преобразовать тепло (тепловую энергию) в работу в ходе непрерывного процесса. Второе начало никогда до сих пор не нарушалось, в то время как первое начало пришлось модифицировать в случае, когда происходят ядерные реакции. Для большинства из вас может оказаться неожиданностью, что основные идеи, связанные с первым началом термодинамики, были открыты гораздо раньше, чем само это начало! Сади Карно, открывший основные идеи, которые привели к открытию второго начала термодинамики, был блестящим французским военным инженером. Этот гений прожил ровно 36 лет и написал только одну важную статью, но эта статья заложила основы одного из самых таинственных законов физики. Второе начало термодинамики также является и самым глубоким законом, поскольку оно указывает стрелу времени.

Сади Карно, старший сын Лазара Карно, родился 1 июня 1796 года в Париже. Лазар Карно назвал своего сына Сади в честь знаменитого персидского поэта и философа Сади из Ширази. Сади Карно рос в то время, когда французская политика и наука были на подъеме. Отец Сади Карно был знаменитым генералом и военным министром при Наполеоне Бонапарте. Лазар Карно был также известен своей деятельностью в области инженерной механики. В 1807 году он ушел из политики и сконцентрировался на обучении своего сына математике, наукам, языкам и музыке. Сади Карно поступил в Политехническую школу в возрасте 16 лет. Он учился у выдающихся преподавателей, таких, как Гей-Люссак, Пуассон и Ампер. Его современниками были выдающиеся ученые – Навье и Кориолис. Проведя несколько лет в армии, он сосредоточил свои усилия на учебе и исследовательской деятельности.

Сади Карно был увлечен паровой машиной, поскольку она произвела глубокий переворот в промышленной революции в Англии. Он стремился популяризировать использование паровых машин во Франции. В 1824 году он

написал монографию, озаглавленную “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу”. Эта монография содержала как теоретические, так и сугубо практические положения, связанные с преобразованием тепловой энергии в механическую. Эта монография начинается следующим утверждением<sup>1</sup>:

*“Каждый знает, что тепло может производить движение. В наши дни, когда повсюду хорошо известны паровые машины, не может быть сомнений, что тепло производит значительную движущую силу. Изучение таких машин представляет огромный интерес, его важность несомненна, их применение все время расширяется, и они, вероятно, приведут к великой революции в промышленном мире.”*

## **Теория теплорода**

В 1824 году закон сохранения энергии (т.е. первое начало термодинамики) был еще не известен. Большинство ученых полагало, что тепло не может быть создано или уничтожено. Теплота рассматривалась как невидимая жидкость, не имеющая массы, перетекавшая от одного тела к другому: в этом, как предполагалось, и состоял процесс передачи тепла. По предложению знаменитого французского химика Лавуазье эта жидкость называлась “теплородом”. Теория теплорода царила в течение нескольких сотен лет. Она подразумевала, что теплород не может возникать и исчезать. Следовательно, количество тепла во Вселенной должно быть конечным. Главное ограничение этой теории состояло в предположении, что механическая энергия не может быть преобразована в тепло. В 1798 году Каунт Румфорд (Count Rumford) неопровержимо показал, что механическая энергия преобразуется в тепло с помощью обычных средств. Его эксперименты не удовлетворили последователей теории теплорода, потому что он не смог количественно оценить соотношение между механической и тепловой энергией. Позже Роберт Майер (Robert Mayer), доктор медицины, выдвинул предположение, что тепловая и механическая энергия являются различными формами одной и той же энергией, но его идеи не были восприняты. Роберт Майер получил грубую оценку соотношения между работой (измеренной как произведение силы на расстояние) и теплом, измеренным в калориях. Этот замечательный результат не был понят в течение долгого времени, потому что Майер, будучи врачом, избрал линию аргументации, которая была чужой физикам и химикам того времени. Чтобы опровергнуть теорию теплорода, которую разделяли большинство физиков и химиков, в то время требовался хороший эксперимент, который позволил бы получить количественное соотношение между механической энергией и теплотой. Джеймс Прескотт Джоуль (James Prescott Joule) и лорд Кельвин (Kelvin) (первоначально Вильям Томпсон – William Thompson) выполнили серию элегантных экспериментов между 1850 и 1860 годами с целью получить количественное соотношение между механической и тепловой энергией. Это привело к смерти теории теплорода к концу 19 века.

## **Второе начало**

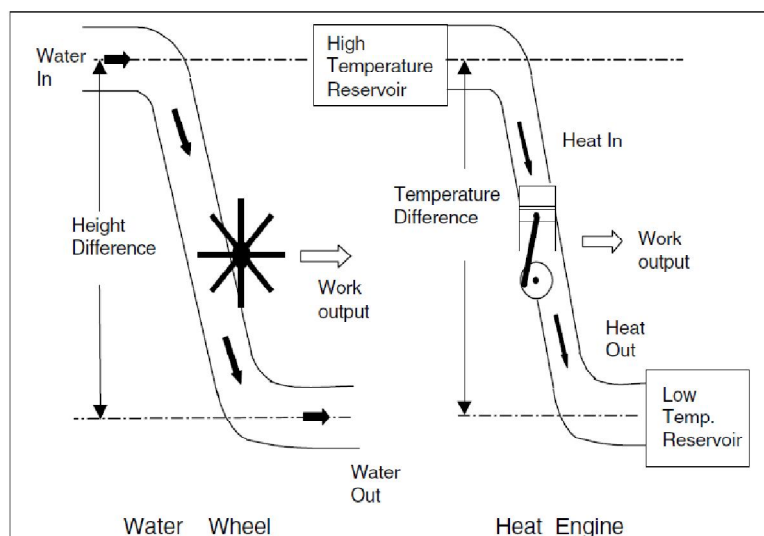
Однако Сади Карно сформулировал основные идеи, важные для второго начала термодинамики, в то время, когда царствовала теория теплорода. Каким-

---

<sup>1</sup> Здесь и ниже приведен перевод цитат с английского языка автора статьи. Я не стал воспроизводить известные версии перевода монографии Карно на русский язык (см., например, перевод Э. Фриша [Карно, 1923]) - Прим. перев.

то образом Карно сумел верно сформулировать второе начало термодинамики, хотя не понимал первого начала. Он пришел к основным положениям второго начала благодаря знанию гидравлических турбин. Его отец, Лазар Карно, был хорошо знаком с разработкой водяных колес для извлечения кинетической энергии из потенциальной энергии падающей воды. Сади Карно предположил, что простейшая тепловая машина расположена между двумя тепловыми резервуарами. Тепловая машина является устройством, которое работает в цикле и преобразует тепло в работу.

На водяное колесо поступает вода из гидравлического резервуара с более высоким напором, а отдается вода с более низким напором. Следовательно, оно преобразует часть потенциальной энергии падающей воды в кинетическую энергию водяного колеса. В водяном колесе потенциальная энергия, которой обладает вода, может быть извлечена в виде кинетической энергии без какой-либо потери воды. Карно аргументировал, что, подобно водяному колесу, тепловая машина получает тепло из теплового резервуара с более высокой температурой и передает тепло теплому резервуару с более низкой температурой (см. рисунок). Поскольку он исходил из теории теплорода, он полагал, что в ходе данного процесса тепло не теряется.



Гидравлическая аналогия тепловой машины по Карно.

Слева – схема *гидравлической* машины: входной поток воды отдает водяному колесу часть энергии, пропорциональную разности высот (Height Difference). Справа – схема *тепловой* машины: входной поток тепла отдает рабочему телу часть энергии, пропорциональную разности температур (Temperature Difference) между входным (высокотемпературным) и выходным (низкотемпературным) тепловыми резервуарами. Упомянутая часть энергии преобразуется в механическую работу (Work output).

По его собственным словам, *“производство движущей силы обусловлено поэтому в паровой машине не фактическим поглощением тепла, но его переносом от горячего тела к холодному телу”*. Теперь из первого начала термодинамики мы знаем, что это неверно. Хотя Сади Карно не применял первое начало термодинамики в правильном виде, он постулировал, что тепловая машина не может преобразовать в работу все тепло в ходе циклического процесса. Карно, подобно многим гениям, смог прийти к правильной формулировке второго начала термодинамики, потому что руководствовался

своей интуицией. Поистине замечательно, что Карно смог открыть второе начало, не понимая первого!

Сегодня многим студентам гораздо легче понять первое начало, чем второе. И это понятно. Закон сохранения механической энергии хорошо известен и легко понимается. Первое начало просто расширяет этот закон на понятие тепловой энергии. Однако великие ученые 18-го и 19-го веков думали о теплоте как о материальной жидкости и, следовательно, были неспособны увидеть, что механическая энергия легко может быть преобразована в теплоту с помощью трения.

В то же время обратное преобразование – дело совсем не такое легкое! Сади Карно попытался установить, какая часть тепла (тепловой энергии) может быть преобразована в механическую работу в ходе циклического процесса. Понятие циклического процесса – центральное среди различных положений Сади Карно. Это естественно, поскольку он прежде всего исходил из устройства, подобного паровым машинам, которые работают циклически и преобразуют тепло в работу. Тепловая эффективность паровых машин (т.е. отношение извлеченной работы к количеству подведенного тепла) составляла в 18-м веке менее 5%. Следовательно, имелась насущная необходимость найти способы повышения эффективности тепловых машин. Сади Карно постулировал существование идеальной тепловой машины, эффективность которой была бы независимой от используемого рабочего тела, а зависела бы лишь от температуры горячего и холодного тепловых резервуаров. Воистину этот постулат был созданием вдохновенного гения. По его собственным словам:

*“Движущая сила водопада зависит от его высоты и количества жидкости; движущая сила тепла также зависит от количества используемого тепла и от того, что может быть названо высотой ее падения, т.е. от разности температур тел, которые обмениваются теплом. В водопаде движущая сила в точности пропорциональна разности высокого и низкого уровней в резервуарах. В потоке теплоты движущая сила, несомненно, растет с увеличением разности температур между горячим и холодным телами.”*

Основные принципы, предложенные Карно, являются основой для вывода второго начала термодинамики во всех современных учебниках по технической термодинамике. Монография, опубликованная им в 1824 году, в действительности не была понята и оценена при его жизни. Это, в частности, произошло потому, что он значительно опередил свое время, а также потому, что теория теплорода, которой он придерживался, подвергалась нападкам со стороны многих ученых. Эмиль Клапейрон осознал важность работы Карно и развил его идеи дальше, построив термодинамические диаграммы для идеальной тепловой машины. Кельвин дополнил решение проблемы, показав, что идеальная тепловая машина может быть использована для определения абсолютной шкалы температур. Рудольф Клаузиус, профессор физики в Берлине, сформулировал второе начало термодинамики без использования концепции теплорода. Он определил важное понятие энтропии, которое прямо вытекает из основных положений, введенных Сади Карно.

После публикации своей монографии в 1824 году Сади Карно исследовал теорию теплоты и далее, он начал сомневаться в теории теплорода. Он умер 24 августа 1832 года в Париже вследствие эпидемии холеры. Многие из его неопубликованных работ ушли вместе с ним. Поэтому мы никогда не узнаем, смог ли он переформулировать второе начало без привлечения идеи теплорода. С учетом преждевременной смерти Карно правильная формулировка второго начала термодинамики была создана только в 1865 году, первым ее в красивой форме сформулировал Клаузиус:

1. Энергия Вселенной остается постоянной.
2. Энтропия Вселенной стремится к максимальному значению.

Можем ли мы утверждать, что Сади Карно открыл второе начало термодинамики? Большинство ученых считают энтропию краеугольным камнем второго начала термодинамики, поэтому не рассматривают Карно в качестве первооткрывателя этого закона. Монография, опубликованная в 1824 году, была первой попыткой установить эффективность преобразования тепла в работу в ходе циклического процесса. Без оригинальных и революционных идей Карно открытие второго начала могло бы произойти гораздо позже.

## Литература

**[Карно, 1923]** Сади Карно. Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. Перевод Э. Фриша. По редакции и с примечаниями В. Р. Бурсиана и Ю. А. Круткова. 1923. ГИЗ. Москва. Петроград. С. 82. Доступно по ссылке

[http://publ.lib.ru/ARCHIVES/K/KARNO\\_Nikola\\_Leonar\\_Sadi/Karno\\_N.L.S..html](http://publ.lib.ru/ARCHIVES/K/KARNO_Nikola_Leonar_Sadi/Karno_N.L.S..html)

См. также <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1165074&uri=index.html>