



*Einstein Refrigerator*

*Patent number US1781541 -- November 11, 1930*

*Albert Einstein  
Leo Szilard*

# ПОЛ СЕН ХОЛОДИЛЬНИК ЭЙНШТЕЙНА

КАК ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУР  
ОБЪЯСНЯЕТ ВСЕЛЕННУЮ



ТРАЕКТОРИЯ

Термодинамика —  
великая наука  
с великой историей

CoRpus

ЭЛЕМЕНТЫ 2.0

**Пол Сен**  
**Холодильник Эйнштейна.**  
**Как перепад температур**  
**объясняет Вселенную**  
**Серия «Элементы 2.0»**

*Текст предоставлен правообладателем*

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=67165529](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=67165529)*

*Холодильник Эйнштейна. Как перепад температур объясняет Вселенную / Пол Сен; пер. с англ. З. Мамедъярова: АСТ: CORPUS;*

*Москва; 2022*

*ISBN 978-5-17-135044-4*

### **Аннотация**

Пол Сен – режиссер-документалист, посвятивший себя популяризации науки, – познакомился с термодинамикой, когда осваивал инженерное дело. Термодинамика изучает свойства энергии и энтропии, которыми объясняется поведение множества физических систем, от клеток живых организмов до черной дыры в сердце нашей Галактики. Тем не менее термодинамика, как правило, остается в тени других разделов физики. Стремясь исправить эту несправедливость, Сен рассказывает историю этой науки и знакомит читателей с трудами целого ряда блестящих инженеров, физиков, биологов, космологов и математиков, от

Сади Карно до лорда Кельвина, Джеймса Джоуля, Альберта Эйнштейна, Эмми Нётер, Алана Тьюринга и Стивена Хокинга.

*В формате PDF A4 сохранен издательский макет.*

# Содержание

Пролог	8
Глава 1	14
Глава 2	25
Глава 3	53
Конец ознакомительного фрагмента.	63

**Пол Сен**  
**Холодильник Эйнштейна.**  
**Как перепад температур**  
**объясняет Вселенную**

*Посвящается Джозефу и Нейтану*

PAUL SEN

EINSTEIN'S FRIDGE

HOW THE DIFFERENCE BETWEEN HOT AND COLD  
EXPLAINS THE UNIVERSE

*Перевод с английского Заура Мамедьярова*

This edition is published by arrangement with PEW Literary Agency Limited, Conville & Walsh Ltd., and Synopsis Literary Agency

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив “Траектория” (при финансовой поддержке Н. В. Каторжнова)



© 2021 by Furnace Limited

© 3. Мамедьяров, перевод на русский язык, 2022

© А. Бондаренко, художественное оформление, макет,  
2022

© ООО “Издательство АСТ”, 2022

Издательство CORPUS ®



**ТРАЕКТОРИЯ**

**ФОНД ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ, ОБРАЗОВАТЕЛЬ-  
НЫХ И КУЛЬТУРНЫХ ИНИЦИАТИВ**

Фонд “Траектория” создан в 2015 году.

Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия.

Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд “Траектория” поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

[www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)

# Пролог

Страшным словом “термодинамика” называется, пожалуй, самая полезная и универсальная научная теория из всех когда-либо созданных.

Судя по названию, это узкая научная дисциплина, которая занимается исключительно поведением теплоты. Истоки теории действительно таковы, но она разрослась гораздо шире и теперь дает нам способ постичь загадки Вселенной.

В ее основе лежат три понятия: энергия, энтропия и температура. Если бы люди не представляли их себе и не знали законов, которым они подчиняются, остальная наука – физика, химия и биология – была бы несостоятельной. Законы термодинамики управляют всем – от атомов до живых клеток, от двигателей, питающих энергией мир, до черной дыры в центре галактики. Термодинамика объясняет, почему нам необходимо есть и дышать, как включается свет и каким будет конец Вселенной.

Термодинамика – это область знаний, на которой основан современный мир. После ее открытия человечество сделало самый большой в своей истории шаг вперед. Мы живем дольше, а наше здоровье крепче, чем когда-либо ранее. Большинство детей, которые рождаются сегодня, становятся взрослыми. Хотя в настоящем хватает проблем, мало кто из нас согласился бы поменяться местами со своими предками.



Все это объясняется не только термодинамикой, но без нее ничего бы не вышло. От канализационных насосов до реактивных двигателей, от надежного снабжения электроэнергией до биохимии спасающих жизни лекарств – все технологии, которые мы воспринимаем как должное, требуют, чтобы мы понимали, что такое энергия, температура и энтропия.

И все же, несмотря на свою важность, термодинамика остается Золушкой среди наук. С ней поверхностно знакомятся в курсе школьной физики, причем об энтропии – ключевой концепции для понимания Вселенной – на уроках упоминается лишь вскользь.

Я впервые столкнулся с термодинамикой на втором курсе бакалавриата, когда учился на инженера в Кембриджском университете, и тогда мне показалось, что термодинамика имеет ценность лишь при проектировании автомобильных двигателей, паровых турбин и холодильников. Если бы мне сказали, что она дает универсальный способ понимать всю науку, то я бы, вероятно, уделил ей больше внимания. Большинство взрослых знакомится с темой подобным образом: даже люди, которые считают себя образованными, не знают о величайшем научном достижении человечества. Мы считаем калории, оплачиваем счета за электроэнергию, беспокоимся о температуре на планете, но даже не понимаем принципов, которые лежат в основе всего этого.

Термодинамика кажется Золушкой и тогда, когда речь заходит о трудах Эйнштейна. Все признают революционный

характер его открытий, но мало кто понимает, в какой степени его работа основана на термодинамике и какой большой вклад он сам внес в эту сферу. В 1905 году, который прозвали “годом чудес”, он опубликовал четыре статьи, совершившие переворот в физике, включая статью с формулой  $E = mc^2$ . Нельзя сказать, что эта работа появилась из ниоткуда, ведь за предыдущие три года Эйнштейн опубликовал три статьи по термодинамике, и первые статьи “года чудес” – об атомном строении вещества и о квантовой природе света – стали продолжением этих исследований. В третьей статье “года чудес”, заложившей фундамент специальной теории относительности, он вдохновлялся термодинамикой в своем подходе к физике, а в четвертой, содержащей формулу  $E = mc^2$ , объединял ньютоновское понятие массы с термодинамическим понятием энергии.

Эйнштейн сказал о термодинамике: “Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убежден <...> она никогда не будет опровергнута”.

Проявляя интерес к термодинамике, Эйнштейн не ограничивался ее ролью в фундаментальной и теоретической физике. Он также изучал ее практическое применение. В конце 1920-х годов он занимался разработкой холодильников, надеясь сделать их дешевле и безопаснее доступных в то время. Этот малоизвестный эпизод его биографии нельзя назвать странным отклонением от курса: Эйнштейн посвятил проекту несколько лет и сумел договориться о его финансиро-

вании с компаниями-разработчиками AEG и *Electrolux*. Интерес к холодильникам проснулся у Эйнштейна в 1926 году, когда он прочитал в берлинской газете статью о семье с несколькими детьми, которая погибла из-за смертоносных газов, испускаемых неисправным холодильником. Узнав об этом, Эйнштейн запустил проект по разработке более безопасных устройств.

Термодинамика не просто великая наука. Она имеет и великую историю.

\* \* \*

В начале 2012 года я работал над документальным фильмом и наткнулся на тонкую книжицу “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу”, которую в 1824 году на собственные деньги опубликовал в Париже молодой француз Сади Карно, живший затворником.

Карно умер от холеры в возрасте 36 лет, полагая, что его труды будут забыты. Однако через два десятилетия после смерти его уже считали отцом-основателем термодинамики. Позже в XIX веке великий физик лорд Кельвин сказал о работе Карно: “Этот короткий очерк стал поистине эпохальным подарком науке”.

Книга увлекла и меня. Работа Карно не похожа на другие труды по фундаментальной физике: в ней алгебраиче-

ские выкладки и физические наблюдения сочетаются с размышлениями о строительстве счастливого и справедливого общества. Карно, которого глубоко волновала судьба человечества, считал науку ключом к прогрессу.

Исследования Карно также стали ответом на масштабные социальные изменения в Европе начала XIX века. В этом отношении “Размышления” оказались в равной степени продуктом двух революций – Великой французской и промышленной – и блестящего ума Карно. Затем я стал читать об ученых, которые перехватили у него эстафету, и увидел, что происходящее в мире оказывало влияние на труды каждого из них. История термодинамики рассказывает не только о том, как люди приобретают научное знание, но и о том, как это знание формируется под влиянием общества и, в свою очередь, принимает участие в формировании этого общества.

В настоящей книге утверждается, что история науки имеет огромное значение. Исследователи, раздвигающие горизонты наших знаний, гораздо важнее генералов и монархов. В связи с этим на страницах своей книги я собираюсь прославить героев и героинь науки и представить их стремление докопаться до истины о сущности Вселенной как величайшее творческое предприятие. Сади Карно, Уильям Томсон (лорд Кельвин), Джеймс Джоуль, Герман фон Гельмгольц, Рудольф Клаузиус, Джеймс Клерк Максвелл, Людвиг Больцман, Альберт Эйнштейн, Эмми Нетер, Клод Шеннон, Алан

Тьюринг, Джейкоб Бекенштейн и Стивен Хокинг входят в число умнейших людей в истории. Узнав об их работе, мы получим способ осознать и оценить одно из величайших достижений человеческого разума.

Людвиг Больцман, один из героев этой истории, выразился так:

Прекрасно, должно быть, командовать миллионами людей в великих государственных начинаниях и вести сотню тысяч человек к победе в битве. Но мне кажется, что еще важнее открывать фундаментальные истины, сидя в скромной комнате и будучи стесненным в средствах, ведь эти истины останутся основой человеческого знания, когда память о битвах сохранится лишь в архивах кропотливого историка.

# Глава 1

## Путешествие по Британии

*Количество паровых двигателей непомерно возросло.*

*Французский экономист и предприниматель Жан-Батист Сэй после визита в Британию*

Девятнадцатого сентября 1814 года Жан-Батист Сэй, 47-летний французский предприниматель и экономист, на два с половиной месяца отправился с разведывательной миссией в Британию. Три месяца ранее Наполеона сослали на остров Эльба в Средиземном море, и французская торговая блокада северного соседа прекратилась. Новое правительство в Париже ухватилось за возможность изучить причины британского экономического подъема, и Жан-Батист Сэй оказался идеальным человеком для выполнения этой задачи. Подростком Сэй два года прожил в Британии, где работал в конторах различных британских торговых компаний, постепенно осваивая английский язык. После этого он вернулся на текстильную фабрику на севере Франции и стал публиковать работы по экономике, что помогло ему изучить как практические, так и теоретические аспекты торговли.

Разведывательная миссия Сэя не была ни опасной, ни тайной. Он не скрывал причины своего пребывания в Британии.

Общительный англофил, он путешествовал по стране, посещая шахты, заводы и порты, а на досуге – театры и загородные дома. Вспоминая свой прошлый визит, с которого прошло уже 26 лет, Сэй отмечал, что страна преобразилась. Его путешествие началось в Фулхэме, поселке к западу от Лондона, где он жил в юности. Там все изменилось до неузнаваемости. Везде стояли новые дома, а на месте луга, по которому он любил гулять много лет назад, пролегла торговая улица.

Для Сэя преобразование Фулхэма стало наглядным примером того, что в XVIII веке случилось со всей страной. Численность населения Британии резко возросла с 6 до 9 миллионов человек, и эти люди питались и одевались лучше всех в Европе, получая самые высокие жалованья. Торговля тоже процветала – Сэй отметил, что число судов в лондонском порту увеличилось втрое, до трех тысяч. В других регионах он видел новые каналы и газовое освещение на городских улицах. Он осмотрел сталелитейный завод по производству деталей станков в Бирмингеме, семиэтажную текстильную фабрику в Манчестере, угольные шахты в районе Йорка и Ньюкасла, а также хлопкопрядильную фабрику в Глазго, где использовали паровую тягу. Ее владелец, некий Финли, так гордился своими машинами и так мало опасался потенциальной французской конкуренции, что сам показал Сэю, как все работает.

Экономическое чудо питала британская хлопчатобумаж-

ная промышленность, экспортная ценность которой между первым визитом Сэя в 1780-х годах и миссией 1810-х возросла в 25 раз. Во Франции многие, включая приближенных Наполеона, полагали, что легче всего добиться сходного успеха, построив империю, – в конце концов, именно колонии давали Британии доступ к дешевому хлопку-сырцу. Сэй не разделял этого мнения. Он считал колониализм невыгодным в длительной перспективе и полагал, что ключом к британскому успеху служат технологические инновации. Особенно Сэя впечатлила одна технология: “Количество паровых машин повсюду непомерно возросло. Тридцать лет назад на весь Лондон их было две или три, а теперь – тысячи. <...> Более невозможно вести прибыльную промышленную деятельность, не имея их мощной поддержки”.

ГСаровая энергия произвела настоящую революцию в британской горнодобывающей промышленности. Шахты, как колодцы, уходят глубоко в землю и подвержены затоплению. В предпромышленные времена насосы на лошадиной тяге не позволяли откачивать воду из шахт глубиной более нескольких метров. Кроме того, поскольку на год прокорма лошади необходимо около гектара земли, в Британии не хватало пастбищ для питания того количества лошадей, которое требовалось для ведения масштабного горного промысла. Но к 1820 году развитие паровой технологии привело к появлению двигателей, которые без труда откачивали воду из шахт глубиной более трехсот метров. В связи с этим сто-



имость добычи угля снизилась, что также привело к более широкому распространению железа, поскольку уголь – ключевой элемент в его производстве. В 1750–1805 годах объемы производства металла возросли в девять раз, с 28 до 250 тысяч тонн в год.

\* \* \*

Паровая энергия в Британии начала XIX века была вездесуща, но все же не так инновационна, как казалось Сэю. Технология распространилась не потому, что британцы отличались особенной изобретательностью, а потому, что их страна была так богата углем, что даже плохо сконструированные и неэкономные двигатели оказывались прибыльными. Возьмем, например, двигатель, установленный на Капрингтонском руднике в 1811 году. Он работал по принципу, предложенному веком ранее английским изобретателем Томасом Ньюкоменом. В современном представлении паровой двигатель – это устройство, где давление горячего воздуха толкает поршень, но более ранние экземпляры правильнее называть вакуумными паровыми машинами. Создаваемое в их печах тепло сложным и неэффективным образом взаимодействует с выполняемой ими механической работой.

“Паровые машины Ньюкомена” работают следующим образом: жар от сжигаемого угля производит пар, который через впускной клапан поступает в большой цилиндр, где

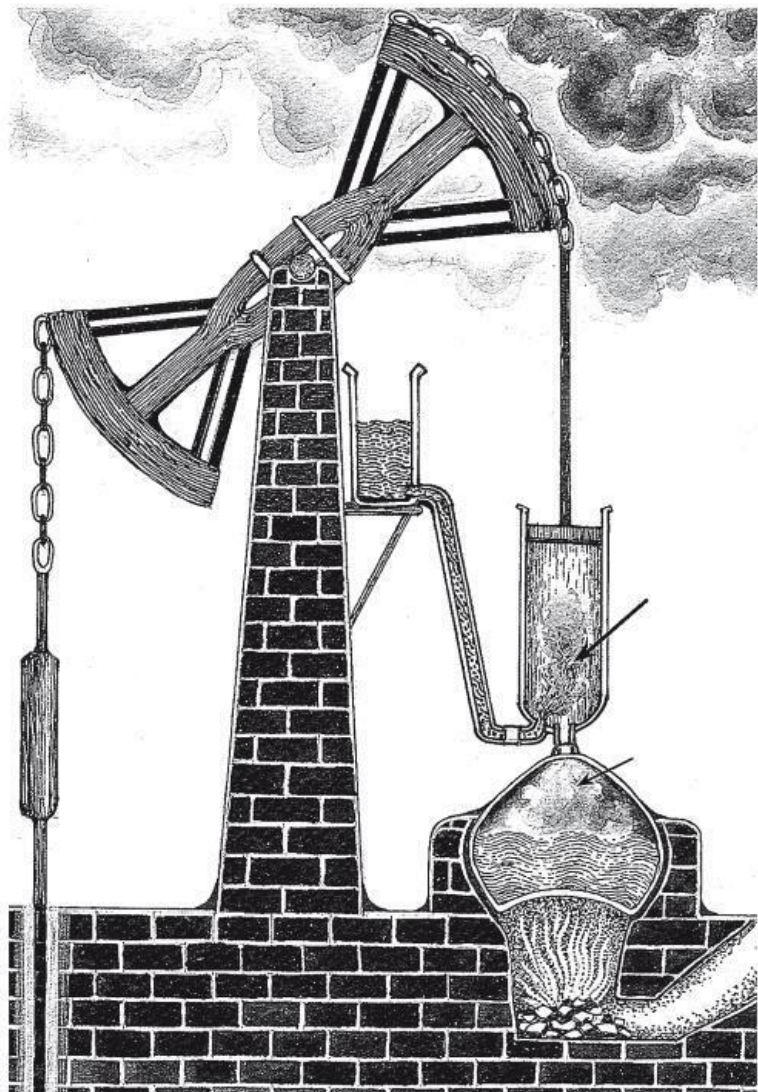
вверх и вниз ходит поршень. Сначала поршень находится в верхней части цилиндра. Когда цилиндр наполняется паром, впускной клапан закрывается. В цилиндр впрыскивается холодная вода, которая охлаждает пар, в результате чего он конденсируется в воду. Поскольку вода занимает гораздо меньше места, чем пар, под поршнем образуется частичный вакуум. Атмосферный воздух всегда пытается заполнить вакуум, и при таком раскладе у него есть лишь один способ для этого – опустить поршень вниз. Таков принцип действия машины. Пар в ней используется для создания вакуума, а работу выполняет направленное вниз атмосферное давление.

Чтобы пронаблюдать этот эффект, налейте немного воды в пустую банку из-под газировки и нагревайте банку, пока она не заполнится паром. В целях предосторожности поднимите банку щипцами – она будет горячей, – быстро переверните и погрузите в миску с ледяной водой. Пар конденсируется в воду, создаст в банке частичный вакуум, и давление земной атмосферы расплющит банку.

При работе описанной паровой машины этот процесс – наполнение цилиндра паром и конденсация пара в воду для создания частичного вакуума – повторяется снова и снова. В результате поршень ходит вверх и вниз, сообщая энергию насосу.

Паровые машины Ньюкомена потребляли огромное количество угля. Одна машина сжигала целый бушель – 84 фунта (38 кг) – угля, чтобы поднять 5-10 млн фунтов (2,5–4,5 млн

кг) воды на один фут (0,3 м). Этот показатель – количество воды, поднимаемой на один фут при сжигании одного бушеля угля, – назывался *производительностью* машины. По современным стандартам описываемые машины были крайне неэффективными и теряли около 99,5 % тепловой энергии, высвобождаемой при сжигании угля.



## Паровая машина Ньюкомена

Столь неэкономные машины использовались более века исключительно благодаря дешевизне угля. Во время визита Сэя британские шахты давали по 16 миллионов тонн угля ежегодно, причем в новых промышленных городах – Лидсе и Бирмингеме – уголь часто не стоил и десяти шиллингов за тонну. При таких ценах никого не заботила неудачная конструкция паровых машин.

Затем в 1769 году шотландский инженер Джеймс Уатт запатентовал модифицированную версию паровой машины Ньюкомена, полезная мощность которой оказалась выше примерно в четыре раза. Парадоксальным образом появление конструкции Уатта затормозило британские инновации на 30 лет, поскольку Уатт и его бизнес-партнер Мэттью Болтон использовали патентную систему, чтобы не позволить другим инженерам выводить на рынок более совершенные конструкции машин. Тогда, как и теперь, коммерческий успех не всегда шел рука об руку с инновациями.

Кроме того, англичане противоречиво относились к науке. С одной стороны, в XVIII веке растущий средний класс стал проявлять интерес к натурфилософии – именно так в то время назывались науки естественного цикла. Энциклопедии расходились огромными тиражами. На открытых лекциях, где освещалось множество тем, от свойств магнитов до недавних астрономических открытий, собирались целые

толпы. Появлялись неформальные клубы для ведения научных дискуссий, и самым знаменитым из них было Лунное общество, куда входили Уатт и Болтон. С другой стороны, некоторые группы опасались науки, потому что многие ученые, например Джозеф Пристли, открывший кислород, открыто поддерживали радикальную политику Великой французской революции. Пристли поплатился за свои взгляды: в 1791 году озлобленная толпа сожгла его дом и лабораторию.

Более того, в двух английских университетах, Оксфорде и Кембридже, не преподавали предметы, сходные с современной физикой и инженерным делом. Кембридж, альма-матер Исаака Ньютона, систематически обучал студентов математическим принципам, открытым великим ученым. Однако, упиваясь наследием Ньютона, профессора не видели смысла расширять его учение и с подозрением относились к новым математическим техникам, развиваемым за рубежом. В 1806 году, когда прогрессивно настроенный Роберт Вудхауз призывал к внедрению европейского подхода к математике, консервативный журнал *Anti-Jacobin Review* обвинил его в отсутствии патриотизма. Практическое применение математики также не было в приоритете. Да, законы Ньютона описывали такие аспекты обитаемой Вселенной, как орбиты планет, но кембриджские профессора считали, что объясняют эти законы исключительно для тренировки ума студентов из поместного дворянства, которые впоследствии станут слу-

жить церкви и империи. Кембриджские студенты бунтовали против этого, но подход к преподаванию изменился лишь несколько десятилетий спустя.

Во Франции, однако, все было иначе.

\* \* \*

Жан-Батист Сэй опубликовал свои наблюдения о британском экономическом и промышленном перевороте в книге “Об Англии и англичанах”, вышедшей в 1816 году. Его отчет, а также сообщения других людей убедили французских инженеров, предпринимателей и политиков, что сравняться с Британией в экономическом отношении можно только при использовании паровой тяги. Но возникла проблема: к югу от Ла-Манша угля было мало. Французские шахты давали миллион тонн угля в год, в основном в далекой области Лангедок, и цена на уголь никогда не опускалась ниже 26 шиллингов за тонну, что было втрое дороже, чем в промышленной зоне Англии. В связи с этим французские инженеры с самых ранних этапов индустриализации страны заботились об эффективности двигателей, стремясь максимизировать полезную мощность при сжигании определенного количества угля, хотя большинству их британских коллег не было до этого дела.

Кроме того, во Франции совсем иначе, чем в Британии, осуществлялось обучение естественным наукам и матема-

тике. Примером может служить учебное заведение, где Сэй через три года после возвращения на родину стал преподавать промышленную экономику. Национальная консерватория искусств и ремесел не имела ничего общего с элитным Кембриджем. Расположенная в Париже Консерватория была основана французским революционным правительством, ориентированным на народное просвещение, и воплощала уверенность режима в том, что естествознание и математика служат оружием в войне с предрассудками и незаслуженными привилегиями аристократии. Революционеры принимали рациональные законы, чтобы строить рациональное общество. Наполеон впоследствии тоже поддерживал преподавание этих предметов, считая их важными для военных амбиций Франции. Работая в таких условиях, французские ученые отталкивались от трудов Ньютона, делая их фундаментом для создания собственных теорий. Они расширяли его учение и значительно облегчали его практическое применение. В таких местах, как Консерватория, вполне уместной считалась мысль, что математический анализ можно применить к паровым машинам и, в частности, к расчету их эффективности.

И именно здесь молодой студент заложил основы науки термодинамики.



## Глава 2

# Движущая сила огня

*Нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезна.*

*Сади Карно*

*Молодой человек удивительной кротости, он прекрасно воспитан и немного стеснителен... Не стоит подрывать его уверенность в себе.*

*Слова друга о Сади Карно*

Сади Карно, молодой человек, которому не исполнилось и тридцати, обладатель среднего телосложения и “тонкой душевной организации”, был сдержан, замкнут и склонен к уединению. В начале 1820-х годов другие студенты Консерватории искусств и ремесел в Париже практически не замечали его. На сохранившемся портрете он предстает интеллигентным и вдумчивым, но несколько сублильным молодым человеком.

Сади Карно родился 1 июня 1796 года в Малом Люксембургском дворце в Париже. Его отец Лазар, одаренный математик и инженер, в молодости опубликовал статью, в которой предложил способ усовершенствовать конструкцию знаменитого воздушного шара братьев Монгольфье, изобретенного в 1783 году. В других научных очерках Лазар исследо-

вал принципы работы таких механизмов, как водяные мельницы. Лазар восхищался персидским поэтом XIII века Саади, в честь которого дал своему сыну столь необычное имя.

В 1789 году, с началом Великой французской революции, Лазар обратился к политике. Два года спустя он одержал победу на выборах и стал депутатом демократического Законодательного собрания. Затем он прославился эффективной реорганизацией Французской революционной армии. Лазару, в отличие от многих других ведущих французских революционеров, повезло пережить годы террора. В 1796 году, когда родился Сади, Лазар был одним из пяти членов Директории, управлявшей Францией, и ребенок в результате рос в центре величайших политических и интеллектуальных волнений в Европе XVIII века.

Пока Сади был маленьким, Лазар Карно обучал сына сам, но когда предрасположенность Сади к науке стала очевидна, отец отправил его в ведущее высшее учебное заведение Франции – Политехническую школу в Париже. Как и Консерватория искусств и ремесел, куда Сади Карно поступит позже, Политехническая школа была основана в 1794 году по инициативе французского революционного правительства, ориентированного на народное просвещение. (Лазар Карно входил в число ее основателей.) Представители школы путешествовали по Франции в поисках самых талантливых абитуриентов, которых принимали на учебу вне зависимости от состоятельности их семей. Такая схема приносила

определенные результаты, но в основном в школе все равно учились представители высших сословий. Сдать вступительный экзамен было непросто, и лучше всего к нему готовили преподаватели в элитных парижских лицеях и частные репетиторы, у которых и занимался Карно. Он поступил в школу в ноябре 1812 года, когда ему было шестнадцать лет. Лишь двое абитуриентов оказались младше него, но это не мешало Карно занять 24-е из 184 мест.

Политехническая школа предоставила Карно доступ к великолепному двухлетнему курсу о новейших открытиях в математике и физике. Окончив учебу в октябре 1814 года, Карно должен был поступить на службу в инженерный корпус французской армии, но в дело вмешалась история. 18 июня 1815 года британские, прусские и другие союзные европейские войска разгромили Наполеона в битве при Ватерлоо и отправили его в изгнание на далекий остров Святой Елены, находящийся посреди Атлантического океана. Более миллиона иностранных солдат, составлявших так называемую армию Седьмой коалиции, оккупировали Францию и возвели на престол нового короля Людовика XVIII, брата Людовика XVI, который был обезглавлен в период революции. Эти события пагубно сказались на семье Карно – не в последнюю очередь потому, что незадолго до свержения Наполеон назначил Лазара Карно министром внутренних дел. Из-за близости к Наполеону новое французское правительство не доверяло Лазару и потому отправило его в ссылку в

немецкий город Магдебург. Сади Карно остался в Париже, где отныне чувствовал себя отверженным. При Наполеоне старшие офицеры французской армии выделяли и хвалили Сади, поскольку он носил фамилию Карно, но теперь старшие по званию перестали прислушиваться к нему и стали отправлять его в отдаленные районы Франции. Должно быть, он очень обрадовался, когда в 1819 году в звании лейтенанта вернулся в Париж, где его перевели на половинный оклад, благодаря чему он получил возможность заниматься своими делами, лишь изредка участвуя в военных учениях.

В свободное время Карно подпитывал свой интерес к науке и технологиям. Он посещал фабрики в развивающихся промышленных районах Парижа и углублял приобретенные ранее знания, слушая лекции в Консерватории искусств и ремесел, где преподавал Жан-Батист Сэй. Консерватория располагалась в бывшем монастыре на востоке Парижа. По задумке революционного правительства, она, как и Политехническая школа, должна была способствовать народному просвещению. После реставрации Бурбоны продолжили финансирование Консерватории, но из-за связи с прошлыми режимами подозревали многих преподавателей и студентов в тайной подготовке бунта, а потому наводнили заведение шпионами.

Тем не менее в Консерватории царил удивительный дух познания, и именно там Карно познакомился с преподавателем химии Николя Клеманом, который научил его всему,

что было известно о температуре и теплоте.

Понятие температуры проще для восприятия, чем понятие теплоты. Чтобы интуитивно нащупать путь к нему в соответствии с представлениями начала XIX века, считайте температуру мерой того, насколько горячим кажется вещество. Представьте, например, большой чан и маленький ковшик. Оба наполнены водой из одного крана. Если окунуть палец в любой из них, ощущения будут одинаковыми. Если поместить в любой из них термометр, он покажет одинаковые значения.

Понять, что такое теплота, гораздо сложнее. Поставьте оба сосуда на плиту, и температура содержащейся в них воды начнет расти по мере высвобождения “теплоты” при сжигании газа. Но чтобы температура воды в сосудах стала одинаковой, больший из них должен стоять на плите гораздо дольше. Такие наблюдения позволяют предположить, что при воздействии на вещество теплота повышает его температуру на некоторую величину, зависящую от количества вещества. Но что такое теплота? Что выделяется при сжигании газа и делает всё горячее?

Во времена Клемана и Карно большинство ученых считало теплоту невидимой субстанцией, называемой теплородом и состоящей из крошечных невесомых частиц, которые высвобождаются при горении веществ. Предполагалось, что частицы теплорода отталкиваются друг от друга, а потому стремятся от горячего к холодному, сглаживая разницу тем-

ператур. Отскакивая друг от друга, частицы теплорода проникают сквозь крошечные поры, которые, как считалось, существуют во всех веществах, и рассеиваются, тем самым нагревая вещество. Чем больше объем вещества, тем больше теплорода требуется для повышения температуры до заданного уровня. Кроме того, теплород не только нагревает вещества, но порой и приводит к их таянию или кипению. Многие ученые считали теплород газообразным элементом вроде кислорода, который имеет способность перемещаться с места на место. Предполагалось, что теплород, подобно кислороду и другим элементам такого типа, невозможно ни создать, ни уничтожить.

Однако к началу XIX века многие ученые стали подмечать слабости теории теплорода. Одним из них был американский эмигрант Бенджамин Томпсон, который работал в Мюнхене, где занимал должность военного советника курфюрста Баварии. Среди прочего он управлял национальным арсеналом, где обнаружил, что при высверливании каналов в пушечных стволах инструментом, напоминающим огромную буровую головку, создается трение, которое производит огромное количество теплоты. Чтобы изучить этот эффект, Томпсон погрузил пушечный ствол под воду и приступил к высверливанию канала. Через два с половиной часа выделилось столько теплоты, что вода закипела.

В статье, представленной на рассмотрение ведущей научной организации Британии, Королевскому обществу, Томп-

сон утверждал, что теория теплорода объясняет, почему теплота выделяется при горении, но ничего не говорит о трении. В первом случае можно предположить, что частицы теплорода содержатся в топливе и высвобождаются при его сжигании. Как только топливо заканчивается, выделение теплоты прекращается. Трение, однако, кажется неисчерпаемым источником теплоты, которая не перестает выделяться, пока объекты трутся друг о друга под действием механического усилия. Иными словами, складывалось впечатление, что трение *создает* теплоту, а не освобождает ее. Это шло вразрез с положением теории теплорода о том, что теплоту нельзя ни создать, ни уничтожить. (Томпсон, главный критик теории теплорода, женился на Марии-Анне Лавуазье, вдове одного из основоположников теории, знаменитого французского химика Антуана Лавуазье, который был казнен в период террора. Брак Томпсона с мадам Лавуазье оказался коротким.)

Помимо сильных и слабых сторон теории теплорода, Карно узнал о вкладе Клемана в изучение теплоты и, в частности, выяснил, что он разработал объективный способ ее количественной оценки. До Клемана, несмотря на целое столетие использования паровых машин, не существовало универсальной единицы измерения количества теплоты. Корнуоллские горные инженеры ввели представление о “мощности” двигателя, которая определялась количеством фунтов воды, поднимаемых на один фут при сжигании в котле одного бушеля угля. Однако инженерам не приходило в голову

измерять количество теплоты, выделяемой углем при сжигании. Люди также знали, например, что кипячение литра воды требует больше теплоты, чем кипячение литра спирта, но не имели общепринятого способа провести количественное сравнение. Клеман его нашел.

Нам известно об этом из сохранившегося анонимного конспекта лекций Клемана. В нем содержатся исторические слова: “Месье Клеман представляет единицу теплоты, которую называет «калорией». Одна калория – это количество теплоты, необходимое для нагревания одного килограмма воды на один градус Цельсия”. Это определение калории по-прежнему верно при измерении энергетической ценности пищи. Например, юо-граммовый пакет картофельных чипсов, содержащий около 500 калорий, по определению Клемана, выделит при сгорании достаточно теплоты, чтобы повысить температуру 500 килограммов воды на 1 градус Цельсия. (Несколько десятилетий спустя ученые изменили определение калории и стали обозначать этой единицей количество теплоты, необходимое для нагревания одного грамма, а не килограмма воды на один градус Цельсия, поэтому одна калория Клемана эквивалентна тысяче современных.)

На Карно также оказали влияние научные статьи его отца Лазара, написанные в предшествующую революции декаду.

В одной из них, получившей название “Эссе о машинах”, Лазар математически проанализировал работу водяных мельниц.



В частности, Лазар представил *идеальную* мельницу, где “толкательная сила” воды преобразуется во вращательное движение колеса без потерь. На такой мельнице скорость течения воды постепенно замедляется при вращении колеса, поскольку вся скорость потока преобразуется во вращательное движение. Лазар отметил, что настоящие мельницы далеки от идеала, но о способах исправить ситуацию упомянул лишь вскользь. Вместо этого он сосредоточился на физике гидроэнергетики и обратился к математике. Строители мельниц, как и следовало ожидать, не обратили внимания на его абстрактные рассуждения, но его сыну такой подход помог оставить более заметный след в науке.

В 1821 году Карно отправился в Магдебург, чтобы несколько недель провести с пребывающим в изгнании отцом и младшим братом. Момент для путешествия был более чем подходящим. Три года ранее в Магдебурге появилась первая паровая машина, которую установил английский инженер – в тот период машин в Европе было немного, и собирали их преимущественно английские специалисты. Логично предположить, что Лазар и Саді осмотрели машину и отметили, что британцы занимают лидирующее в мире положение в паровой технологии. Как бы то ни было, вернувшись в Париж, Саді Карно немедленно приступил к работе над своим важнейшим сочинением. Закончив труд в 1824 году, он назвал его “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу”. Под “движущей

силой” Карно подразумевал полезную работу, например по откачке воды из шахты или по питанию энергией корабля, которую можно обеспечить теплотой, создаваемой в “огне”, или в котле паровой машины.

Сочинение Карно совсем не похоже на современную научную статью. Желая, чтобы его рассуждения были “понятны людям других профессий” – тем, кто не занимается наукой, – он объясняет все доходчиво, избегая специальных терминов.

Прежде чем приступить к изложению теории, Карно пытается убедить читателя, что она имеет большое значение. Он подчеркивает плюсы паровых машин, использующих теплоту для выполнения задач, которые прежде решались с помощью мышечной силы животных, силы ветра или текущей воды, и пишет: “По-видимому, им суждено сделать большой переворот в цивилизованном мире”<sup>1</sup>. Он упоминает даже об утопическом потенциале технологии: “Плавание с помощью тепловых машин сближает в некотором роде наиболее отдаленные нации. Паровая машина связывает народы земли, как если бы они все жили в одном и том же месте”. Объясняя, на что способна паровая энергия, Карно указывает на другой берег Ла-Манша: “Отнять у Англии в настоящее время ее паровые машины – это означало бы <...> уничтожить все средства к процветанию <...> уничтожить эту великую мощь”.

В конце вводной части Карно заявляет о своих намерени-

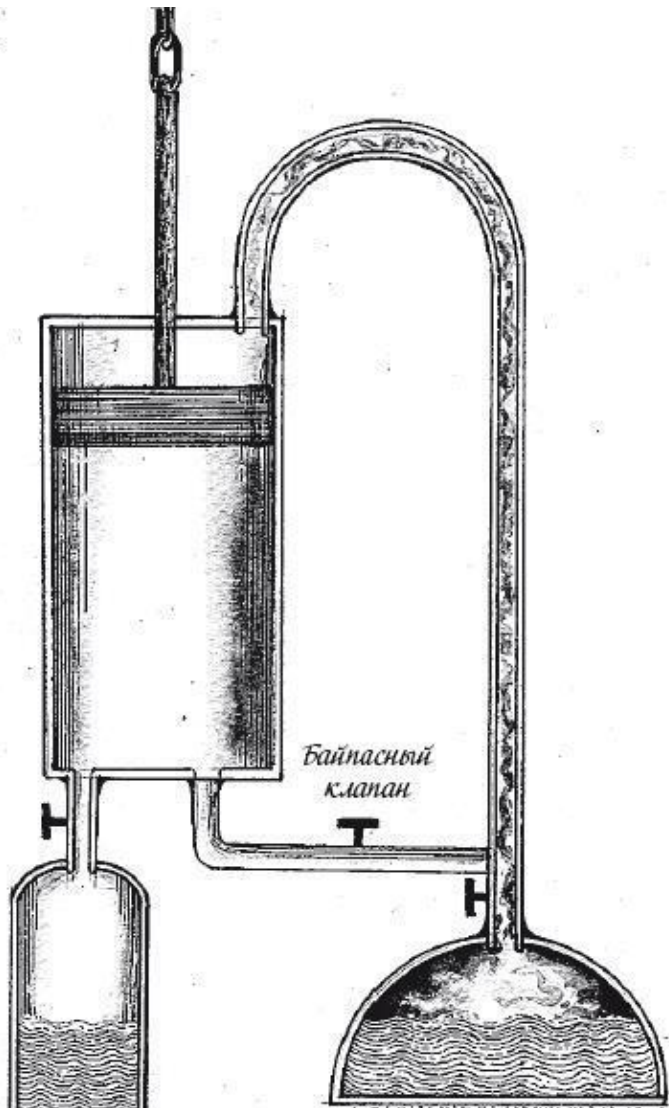
---

<sup>1</sup> Здесь и далее “Размышления о движущей силе огня” приводятся в переводе С. Э. Фриша. (Здесь и далее, если не указано иное, – прим, перев.)

ях: “Несмотря на работы всякого рода, предпринятые относительно паровых машин <...> их теория весьма мало продвинута и попытки их улучшить почти всегда руководились случаем”.

Таким образом, в представлении Карно создание теории, лежащей в основе работы паровых машин, было не просто научным упражнением. Он полагал, что это даст способ повысить топливную эффективность двигателей и тем самым снизит издержки для французских промышленников, благодаря чему они смогут угнаться за британскими коллегами. Главный вопрос, стоявший перед Карно, звучал следующим образом: как получить как можно большую движущую силу от паровой машины?

Карно развивает идею о мощности двигателей. Он спрашивает не сколько угля нужно сжечь, чтобы поднять определенную массу на заданную высоту, а сколько теплоты должно для этого выделяться из котла. Иными словами, если из котла выделяется, скажем, 100 калорий теплоты, то какова максимальная высота, на которую можно поднять один килограмм? (Для простоты представьте одну единицу “движущей силы” как количество теплоты, которое поднимет 1 кг на высоту 1 м.)



## Приблизительная схема ключевых элементов машины Уатта

Чтобы ответить на этот вопрос, Карно рассматривает типичную для начала XIX века паровую машину, которая работает по принципу, изложенному Джеймсом Уаттом. Французам были особенно интересны два аспекта ее работы.

Во-первых, Уатт заметил, что горячий пар оказывает большое давление, превосходящее даже направленное вниз давление атмосферы. Решив использовать это, он сконструировал свою машину таким образом, чтобы расширяющийся пар из бойлера толкал поршень. (На схеме пар толкает поршень вниз.)

Во-вторых, Уатт понял, что для непрерывной работы машины поршень должен возвращаться в исходное положение в верхней части цилиндра. Для этого пар, который опустил его, необходимо охладить, чтобы он конденсировался в воду и более не толкал поршень вниз. Затем часть движущей силы, произведенной при опускании поршня, используется, чтобы толкнуть поршень обратно вверх.

Уатт обеспечил это, снабдив свою машину конденсатором, который охлаждается водой. Когда поршень приближается ко дну цилиндра, открываются байпасный клапан<sup>2</sup> и

---

<sup>2</sup> *Байпас* — специальный перепускной, или резервный, канал, который обеспечивает функционирование системы в нештатном состоянии, а также используется в иных целях, например для увеличения мощности системы.

клапан конденсатора. Находящийся над поршнем пар уходит через эти клапаны и преобразуется в воду в конденсаторе, а потому больше не толкает поршень вниз.

В своем трактате Карно не рассматривает принципы работы компонентов машины, вместо этого анализируя, каким образом тепловой поток движется по устройству. Придерживаясь теории теплорода, он утверждает, что некоторое количество не подлежащего уничтожению теплорода, выделяемого при сжигании угля в котле, “включается” в пар, тем самым повышая его температуру и давление, чтобы он толкал поршень вниз. Затем, в конденсаторе, теплород удаляется из пара, в результате чего пар охлаждается и превращается в жидкость. При снижении давления пара поршень возвращается в исходное положение.

Карно приходит к выводу, что из горячего котла в холодный конденсатор поступает неизменное количество теплорода и этот поток производит движущую силу машины. Он приравнивает тепловой поток к водяному. Подобно тому, как при вращении мельничного колеса не происходит потерь текущей вниз воды, при работе паровой машины не происходит потерь текущего “в направлении охлаждения” теплорода.

Хотя Карно ошибался насчет теплорода, такие рассуждения привели к его первому открытию. Каким бы большим ни был водоем, если вода в нем не потечет нисходящим потоком, то движущая сила создана не будет. Подобным обра-

зом даже огромное количество теплоты не приведет к созданию движущей силы, если не возникнет разницы температур, обеспечивающей “нисходящий поток” теплоты. Внутри огромного горячего котла паровая машина работать не сможет, несмотря на наличие избыточного количества теплоты, потому что поток невозможно будет охладить и превратить в жидкость, чтобы поршень вернулся обратно в верхнюю часть цилиндра. Карно пишет: “Недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезна”.

Этим предложением был отмечен первый шаг в истории термодинамики.

Далее Карно поднимает вопрос, который в те времена волновал многих инженеров: можно ли считать пар наилучшим веществом для использования в машинах, которые производят движущую силу из теплоты? В конце концов, при нагревании расширяется любой газ, а не только пар, и при расширении его давление повышается. Это значит, что любой газ может толкать поршень. Может ли машина, работающая на атмосферном воздухе или алкогольных парах, производить из заданного количества теплоты больше движущей силы, чем паровая машина? Может ли такая машина при сжигании 1 кг угля нагреть определенную массу до более высокой температуры, чем паровая машина?

В поисках ответа Карно не уделяет внимания конструктивным особенностям реальной машины, а применяет стра-

тегию, позаимствованную у отца, и рассматривает воображаемые машины.

Карно предлагает читателю представить *идеальную* паровую машину, которая производит *максимальную* движущую силу при прохождении заданного количества теплоты из горячей зоны в холодную, то есть поднимает груз определенной массы на максимальную высоту. (Для простоты я буду называть источник теплоты *нагревателем*, а холодную зону, куда в конце концов приходит теплота, *охладителем*.)

Далее Карно описывает гипотетическую машину, которая выполняет все те же шаги *в обратном порядке*, то есть использует движущую силу, чтобы перемещать теплоту из холодной зоны в горячую. Сегодня мы называем такие устройства тепловыми насосами и холодильниками. И снова Карно не уделяет внимания техническим деталям. Он полагает, что если поток теплоты из горячей зоны в холодную способен производить движущую силу и поднимать груз, то может существовать и машина, которая делает противоположную вещь. В такой машине движущая сила, производимая при падении груза, заставляет теплоту перемещаться “восходящим потоком” из охладителя в нагреватель. Можно провести прямую аналогию с водяными мельницами и водяными насосами. Первые используют текущую вниз воду для создания движущей силы, а вторые используют силу, чтобы толкать воду вверх.

Теперь, следуя логике Карно, представьте идеальную ма-



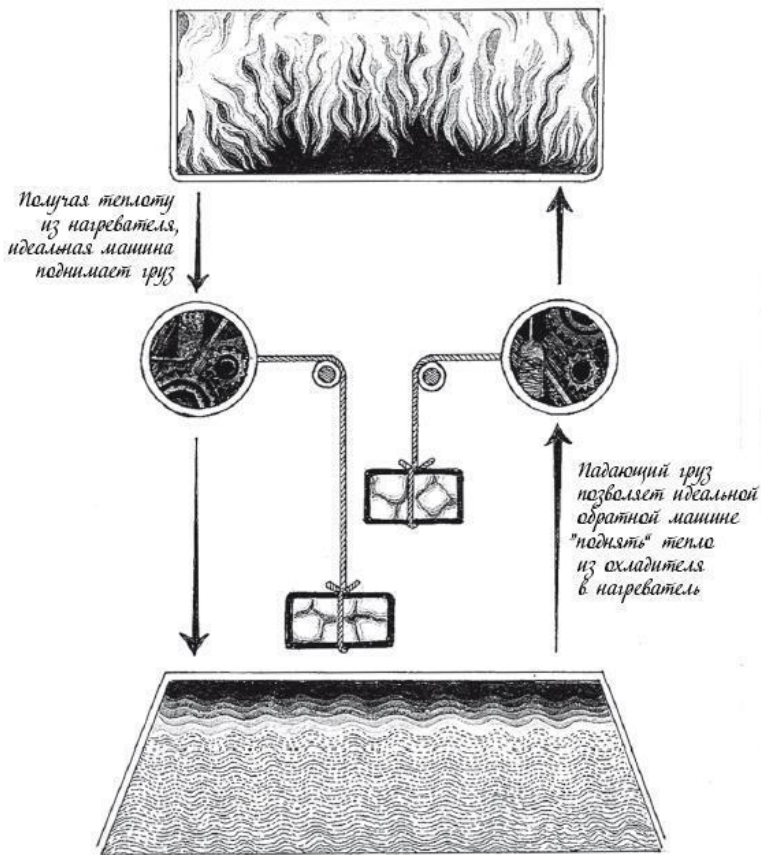
шину, которая получает 100 калорий теплоты из нагревателя и поднимает груз массой 50 кг на 10 м, после чего высвобождает теплоту и отправляет ее в охладитель.

Затем представьте идеальную “обратную” машину, которая при падении груза массой 50 кг на 10 м забирает 100 калорий теплоты из охладителя и перемещает их в нагреватель.

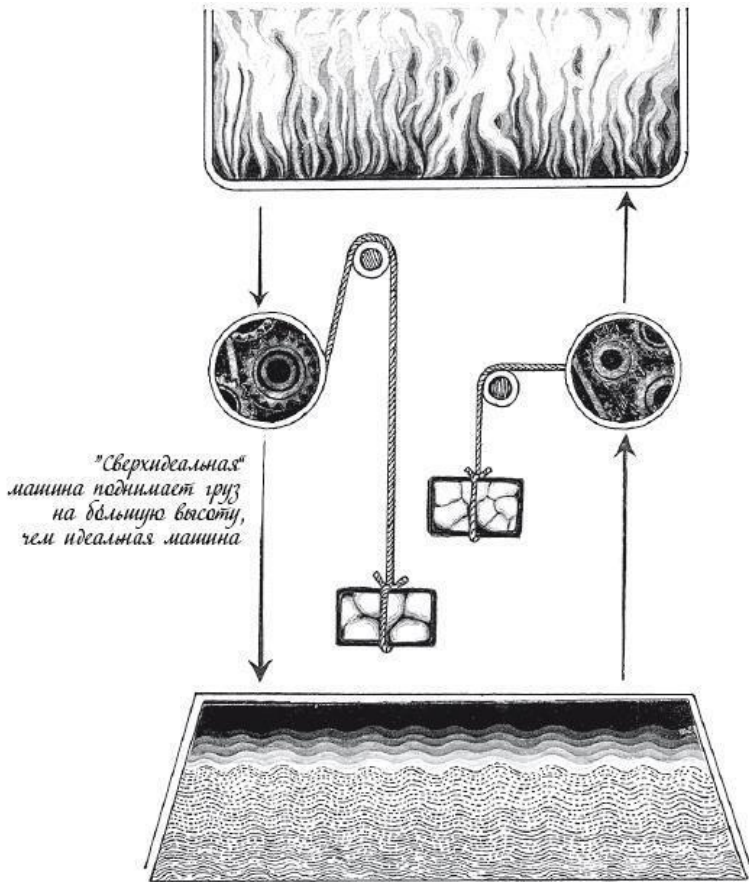
Представив две гипотетические машины, спросите себя: что получится, если их объединить? В такой конфигурации сила, созданная идеальной “прямой” машиной, будет *приводить в движение* идеальную “обратную” машину.

Тепловой поток, идущий от нагревателя к охладителю по идеальной машине, поднимает груз.

После этого груз связывается с идеальной обратной машиной и падает, “поднимая” теплоту из охладителя в нагреватель.



Идеальная машина приводит в движение идеальную обратную машину



“Сверхидеальная” машина приводит в движение идеальную обратную машину

Такая машина будет работать вечно. Сто калорий теплоты

проходят из нагревателя по прямой машине и оказываются в охладителе, поднимая при этом 50-килограммовый груз. Затем груз подсоединяется к обратной машине и падает, в результате чего юс калорий теплоты возвращаются из охладителя в нагреватель. Это питает прямую машину, которая снова поднимает груз, после чего цикл повторяется.

Суть в том, что нагреватель не потеряет никакого количества теплоты, а груз будет бесконечно подниматься и опускаться. Однако – и это важно! – такая система не сможет производить полезную движущую силу. Движущая сила, производимая прямой машиной, полностью поглощается обратной машиной. Для полезной работы – например, откачки воды – ничего не остается.

На следующем шаге Карно проявляет свою гениальность. Он описывает еще одну гипотетическую машину, которая использует вместо пара другой газ, такой как воздух или алкогольные пары, и этот воображаемый газ *лучше* пара. Следовательно, использующая его машина также лучше паровой. Но насколько лучше? Допустим, при перемещении тех же 100 калорий теплоты от того же нагревателя к охладителю она поднимает 50-килограммовый груз на 12, а не на 10 метров.

Как и ранее, Карно анализирует конфигурацию, в которой эта “сверхидеальная” (непаровая) машина приводит в движение идеальную обратную машину. Сто калорий теплоты проходят по сверхидеальной машине. Поскольку она подни-

мает груз на 12 метров, это позволяет ей приводить в движение “обратную” машину, а также^ скажем, водяной насос. Чтобы юс калорий теплоты вернулись из охладителя в нагреватель, обратной машине необходимо, чтобы груз упал всего на 10 метров. Но при работе сверхидеальной машины груз может в конце каждого цикла падать на дополнительные два метра, преодолевая не 10, а 12 метров.

Этот “остаток высоты падения” можно также использовать для откачки воды. Фактически каждый цикл будет давать избыток “энергии падения”. Такая машина будет выполнять полезную работу, не потребляя топлива.

Однако Карно отмечает, что в реальности такая машина существовать не может. Она представляет собой вечный двигатель, создание которого ученые давно признали невозможным. Веками люди мечтали сконструировать устройство, которое выполняло бы полезную работу, не требуя приложения силы животных, текущей воды или ветра. Ни одно из подобных устройств не функционировало, поэтому в 1775 году Королевская академия наук в Париже объявила, что более не будет рассматривать предлагаемые проекты вечных двигателей. В своем сочинении об устройстве водяных мельниц отец Сади также использовал предположение о невозможности вечного движения, чтобы определить верхний предел объема полезной работы, который могут выполнять подобные устройства. Гениальность Сади Карно помогла ему понять, что такая же логика еще лучше приме-

нима к паровым машинам. Он пишет: “Разве не известно *a posteriori*, что все попытки какими бы то ни было методами осуществить *perpetuum mobile* остались бесплодными? Что никогда не удастся получить настоящий *perpetuum mobile*, то есть движение, которое продолжается вечно, без изменения употребляемых тел?”

Поскольку вечное движение невозможно, Карно считает, что невозможно и создать машину, которая производит большую движущую силу, чем идеальная паровая машина. “Подобное создание совершенно противоречит общепринятым идеям, законам механики и здравой физике, — отмечает он. — Оно недопустимо. Необходимо заключить, что *максимум движущей силы, получаемый употреблением пара, есть также максимум движущей силы, получаемой любым средством*”.

Карно сам выделил свой вывод курсивом. Не называя пар лучшим веществом для использования, он утверждает, что *все идеальные машины работают одинаково хорошо вне зависимости от того, какой газ или вещество они используют и каким образом они сконструированы*. Идеальная паровая машина может сильно отличаться от идеальной воздушной машины, но при работе с одним и тем же нагревателем и охладителем обе будут поднимать груз на одинаковую высоту. И это значит, что сами рабочие вещества в машине, например пар или воздух, не создают движущую силу — *ее создает только тепловой поток*.

Рассмотрев паровые машины в идеализированной форме, Карно установил об их эквивалентах из реального мира такие истины, которых не знал ни один инженер. Большинство по-прежнему полагало, что рабочее вещество все же играет некоторую роль в создании движущей силы.

Чтобы понять логику Карно, представьте водяную мельницу. При заданной скорости водного потока максимум создаваемой силы ограничен высотой, с которой падает вода. Никакая хитроумная конструкция не сможет обойти это ограничение. Единственный способ повысить мощность мельницы – увеличить высоту падения воды. Аналогичным образом сила, создаваемая любым тепловым двигателем при заданном тепловом потоке, ограничена разницей температур между нагревателем и охладителем. Единственный способ увеличить ее – увеличить разницу температур. Если уменьшить разницу температур, создаваемая сила, напротив, уменьшится.

Карно также проанализировал, как максимизировать движущую силу, создаваемую нисходящим тепловым потоком при любой заданной разнице температур. В обычной машине такие газы, как пар, под действием тепла расширяются и толкают поршень. В идеальной машине на расширение газа расходуется вся теплота, без потерь, которые могут возникать, например, в результате утечек. (Подробнее см. в Приложении 1.)

Следуя такой логике, Карно понял, что настоящие паро-

вые машины его времени крайне неэффективны. Карно рассчитал, что максимальная температура, которой пар достигал при расширении и толкании поршня, составляла немногим более  $160^{\circ}\text{C}$ . Минимальная температура при конденсации составляла около  $40^{\circ}\text{C}$ . Это значит, что паровые машины производили движущую силу при перепаде температур примерно на  $120^{\circ}\text{C}$ . Но температура в нагревателе машины, где горел уголь, составляла более  $1000^{\circ}\text{C}$ , а следовательно, гораздо больший перепад температур – на  $900^{\circ}\text{C}$  и больше – растрачивался впустую.

И снова нам поможет водяная мельница. Представьте водопад с 10-метровым перепадом высоты. Теперь представьте водяное колесо, которое находится не у подножия водопада, а всего в метре от его вершины. Интуитивно понятно, что значительная часть мощности потока в таком случае теряется. Паровые машины теряют мощность теплового потока подобным образом.

Как это исправить? По мнению Карно, одним из способов было использование атмосферного воздуха в качестве вещества, толкающего поршень. Поскольку воздух содержит кислород, топливо может гореть и производить тепло внутри цилиндра, а не во внешнем нагревателе, как в паровой машине. “Этим была бы избегнута <...> большая потеря в количестве тепла”, – отмечает Карно. У воздуха есть и другое преимущество над паром – более низкая “удельная теплоемкость”. Грубо говоря, это значит, что одно и то же количество



теплоты может поднять температуру определенного объема воздуха на большее количество градусов, чем того же объема пара. Это, в свою очередь, подразумевает, что один и тот же тепловой поток может обеспечивать в воздушной машине больший перепад температур, чем в паровой. Таким образом эффективность повышается еще сильнее. “Употребление атмосферного воздуха для развития движущей силы тепла <...> обнаружит большие преимущества перед водяным паром”, – пишет Карно. Это предсказание исполнилось в конце XIX века, когда появился двигатель внутреннего сгорания, который сжигает бензин или дизельное топливо, чтобы поднимать температуру воздуха в своих цилиндрах значительно выше  $1000^{\circ}$ . Рудольф Дизель, который в 1893 году опубликовал свою теорию создания такого двигателя, вдохновлялся идеями Карно.

Трактат Карно стал великолепной научной работой, продуктом плодотворного воображения, работавшего в связке с разумом, который опирался на факты. Наследие Карно вокруг нас. Двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, гигантские турбины для генерации электричества и даже ракеты, доставившие людей на Луну, были созданы благодаря открытию Карно, который понял, что создание движущей силы происходит при перемещении теплоты из горячей зоны в холодную. Не столь очевидную, но ничуть не менее важную роль наследие Карно сыграло в формировании наших представлений о Вселенной.



Летом 1824 года Карно опубликовал “Размышления о движущей силе огня” за свой счет. Ему было 28 лет. Вероятно, ему лучше было отправить работу в популярный журнал своей альма-матер, Политехнической школы. Быть может, сам стиль “Размышлений”, объединявших социологию, политику и абстрактные рассуждения, сделал их неподходящими для публикации в журнале? Как бы то ни было, Карно опубликовал работу сам, заплатив 459,99 франка, что было, должно быть, не просто, ведь он жил на половинный оклад, все еще состоя на службе во французской армии. Отпечатанные 600 экземпляров поступили в продажу 12 июня 1824 года по цене три франка за штуку. Неизвестно, сколько из них было продано. Впрочем, позже в том же месяце идеи из книги были изложены на семинаре в Академии наук в Париже, но сведений о том, запомнили ли этот семинар ведущие французские ученые и присутствовал ли на нем сам Карно, не сохранилось.

В конце 1820-х годов Сади Карно попал в водоворот французской политики. В 1828 году он ушел в отставку из армии и после этого, похоже, нигде не работал, хотя до нас дошло письмо, в котором сообщается, что он пытался открыть инженерное дело.

Есть основания предположить, что после публикации

“Размышлений о движущей силе огня” Карно потерял веру в свой труд. Хотя его личные бумаги почти не сохранились, его младшему брату удалось найти небольшую стопку из 23 листов, озаглавленную “Заметки о математике, физике и других предметах”. Эти заметки показывают, что Карно сомневался в ключевой гипотезе “Размышлений” о том, что теплота представляет собой не подлежащий уничтожению флюид, называемый теплородом. Рассуждая о моментах, когда теплота совершает заметное действие, например толкает поршень, он пишет: “Количество не может более оставаться постоянным”. Оглядываясь назад, мы можем счесть это замечание свидетельством его безупречных научных инстинктов. Но в представлении Карно оно ставило под сомнение его главное открытие – что без холода тепло бесполезно. Кроме того, если движущую силу производил не теплород, который двигался из горячей зоны в холодную, то гипотеза Карно казалась хлипкой. Как он отметил в своих заметках, “было бы сложно объяснить, почему при развитии движущей силы необходимо холодное тело”. Попытки примирить гипотезу Карно о том, что теплота должна перемещаться из горячей зоны в холодную для создания движущей силы, с воображаемым теплородом открыли следующую главу в нашей истории.

К несчастью, роль Карно на этом закончилась. В 1832 году он был по неясной причине госпитализирован в психиатрическую лечебницу в Иври под Парижем. Пока он лежал

там, во Франции разразилась эпидемия холеры, и Карно стал ее жертвой. Последний взгляд на него мы бросаем, когда он, страдая от лихорадки, мечется в бреду, не понимая огромной важности своей работы. В учетном журнале лечебницы записано: “Месье Карно Лазар Сади, бывший военный инженер, поступил 3 августа 1832 года, страдая от помешательства. Вылечился от помешательства. Скончался от холеры 21 августа 1832 года”.

Ему было 36 лет.

# Глава 3

## Замысел Творца

*Я не занимался ни судами, ни экипажами, ни печатными станками. Моя цель заключалась в том, чтобы сперва отыскать правильные закономерности.*  
*Джеймс Джоуль*

Двадцать четвертого мая 1842 года два брата, которым не исполнилось и тридцати, выплыли на лодке на середину озера Уиндермир, крупнейшего в английском Озерном крае. Пока старший орудовал веслами, младший, сидевший несильно, но заметно ссутулившись, заряжал порохом пистолет. Зачем? Ему хотелось изучить эхо, прислушиваясь к выстрелам, которые гулко отдавались среди холмов. Чтобы выстрел получился громким, молодой человек, которого звали Джеймс Джоуль, положил в пистолет тройную дозу пороха. Отдача оказалась такой сильной, что пистолет упал в озеро, и это служит прекрасным примером непреходящей любви Джоуля к научным экспериментам, которые на первых порах проводились без всякой оглядки на меры предосторожности. В другой раз при осечке у него сгорели брови. В третий он ударил себя самого и друзей электрическим током. Самый жестокий эксперимент он провел, когда с помощью

мощной батареи подверг воздействию тока служанку, которой велел описывать свои ощущения. Джоуль повышал напряжение, пока несчастная не потеряла сознание.

Джеймс Прескотт Джоуль, второй из пятерых детей в семье пивовара, родился в 1818 году в Солфорде, в графстве Ланкашир. Примерно за сорок лет до этого Ричард Аркрайт запустил первую в мире хлопкопрядильную фабрику на паровых двигателях в соседнем Манчестере, который тогда был непримечательным рыночным городом на северо-западе Англии. В последующие годы появились десятки новых фабрик, и промышленники начали внедрять в стремительно растущем Манчестере систему массового заводского производства. В 1801–1830 годах население Манчестера фактически удвоилось и достигло примерно 140 тысяч человек: множество людей со всей страны стекалось в город, прозванный Хлопкополисом. Пивовары Джоули процветали. Рабочие хотели пить, и спрос на пиво возрос настолько, что вскоре после рождения Джоуля его отец мог позволить себе содержать большой дом с шестью слугами в хорошем районе Суинтон.

По собственному свидетельству, в детстве Джоуль был болезненным – до 20 лет он регулярно проходил лечение из-за проблем с позвоночником, которыми объяснялась его легкая сутулость. Он был стеснителен и глубоко привязан к старшему брату, поэтому, чтобы не разлучать их, родители решили дать сыновьям домашнее образование. Семья была настолько состоятельной, что, когда Джоулю исполнилось 16

лет, отец записал его на частные уроки к знаменитому химику Джону Дальтону.

Подростком Джоуль приступил к работе на семейном пивоваренном заводе и почти два десятка лет играл активную роль в управлении предприятием. На первых порах он каждый день с 9 утра до 6 вечера трудился в окружении всевозможных механизмов – насосов и резервуаров, где жидкости перемешивались и нагревались до определенной температуры, – и это определило направление его научных исследований. Изучая заводские машины, он заинтересовался идеями Сади Карно.

Несмотря на одержимость паровыми машинами, Карно главным образом пытался понять, как получить максимальное количество движущей силы из заданного количества теплоты.

Среда, в которой работал Джоуль, подталкивала его идти дальше и спрашивать, существует ли такой источник движущей силы, который был бы лучше, чем теплота. На семейном пивоваренном заводе была установлена паровая машина, и Джоуль знал, какие расходы несет предприятие при покупке угля. Надеясь сократить издержки и проявляя немалое научное любопытство, он решил проверить, сможет ли недавно изобретенный электрический двигатель, питающийся от батареи, обеспечивать работу установленных на заводе насосов и мешалок с меньшими затратами, чем при сжигании угля.

Первые электродвигатели появились в начале 1830-х го-

дов и быстро свели всех с ума. Западный мир погрузился в “электрическую эйфорию”. Появились такие организации, как Лондонское электрическое общество, а российский царь и американское правительство стали финансировать исследования, чтобы выяснить, могут ли новые устройства питать суда и тянуть поезда. В Манчестере начал выходить журнал *The Annals of Electricity* (“Анналы электричества”), редактор которого был дружен с Джоулями и публиковал многие ранние работы Джоуля в своем скромном издании.

К 1840 году, сидя в лаборатории, устроенной в доме родителей, Джоуль конструировал батареи, электромагниты и двигатели, чтобы изучать их работу. Одно из первых его наблюдений стало самым важным. Он заметил, что при прохождении электрического тока провод нагревается. Иными словами, электричество могло не только осуществлять работу, питая двигатель, но и давать теплоту. (Отныне я буду называть “работой” то, что Карно называл “движущей силой” [то есть меру усилия, необходимого для подъема определенной массы на определенную высоту].)

Способность электричества создавать теплоту подкрепила сомнения Джоуля в теории теплорода, которая гласила, что теплоту невозможно ни создать, ни уничтожить. Джоулю казалось, что, проходя по проводу, электрический ток именно создает теплоту.

С характерным прилежанием Джоуль провел измерения и сделал вывод, что даже в случае несостоятельности теории



теплорода существует математическая зависимость между создаваемым теплом, силой тока и сопротивлением провода, по которому этот ток идет. Убеденный в важности своего открытия, Джоуль решил познакомить с ним более широкую аудиторию, чем читатели “Анналов”, и потому отправил статью о нем в самый престижный в Британии научный журнал *The Transactions of the Royal Society*. Хотя выведенное Джоулем равенство сейчас входит в школьный курс физики и лежит в основе работы каждого электротостера, редактор отказал Джоулю в публикации и позволил поместить лишь краткий обзор статьи в менее известном родственном журнале. Таким стало первое из многих препятствий, с которыми Джоуль столкнется в попытках сообщить широкому научному сообществу о своих трудах.

В 1840–1841 годах Джоуль приобрел новые навыки в работе с электричеством и сосредоточился на сравнении затрат на работу электродвигателя и паровой машины. Во времена Джоуля батареи состояли из цинковых пластин, погруженных в кислоту. При растворении цинка в кислоте вырабатывалось электричество, питавшее двигатель, который поднимал груз, то есть выполнял работу. Проводя эксперименты, Джоуль вычислил, что электричество, вырабатываемое при растворении одного фунта (0,45 кг) цинка, может поднять груз массой 331400 фунтов (150320 кг) на высоту в 1 фут (0,3 м). С точки зрения издержек сравнение оказалось в пользу питаемых углем паровых двигателей, которые

при сжигании одного фунта угля, стоившего гораздо дешевле цинка, поднимали в пять раз больший груз массой 1,5 млн фунтов (680388 кг) на высоту в 1 фут.

Это открытие похоронило идею о замене установленной на пивоварне паровой машины на электродвигатель. “Я почти потерял надежду на использование электромагнитов в качестве экономичного источника энергии”, – написал Джоуль. Но при этом оно помогло Джоулю найти способ проводить числовое сравнение разных способов получения работы.

Далее Джоуль приступил к экспериментам с динамо-машинами, преобразующими работу в электричество. Динамо-машины вроде тех, что крепятся к колесам велосипеда, состоят из катушки с проводом, в центре которой находится магнит. Когда велосипед движется, колесо заставляет магнит вращаться, в результате чего на катушку передается электрический ток, который питает фары. Джоуль заметил, что генерируемое динамо-машиной – как и генерируемое батареей – электричество нагревает провод, и решил, что нашел способ испытать теорию теплорода, которая давно вызывала у него сомнения.

По мнению Джоуля, способность электрического тока создавать теплоту имела два объяснения:

1. Теплота, как полагало большинство ученых, объяснялась присутствием теплорода. В таком случае, чтобы нагревать подсоединенные провода, динамо-машина должна была

накачивать их заключенным внутри нее теплородом. Но тогда следовало ожидать, что катушка динамо-машины будет охлаждаться при перемещении теплорода по цепи.

2. Электрический ток *преобразовывался* в теплоту, проходя по проводам.

В конце 1842 и начале 1843 года Джоуль провел серию революционных экспериментов, чтобы определить, какое из двух объяснений верное. Он сконструировал запускаемую заводной рукояткой динамо-машину с любопытной модификацией. Он поместил катушку, проводящую электрический ток, в стеклянную трубку. Затем он наполнил трубку водой, чтобы замечать любые температурные изменения в катушке. Если теплород действительно существовал, то после запуска динамо-машины и выработки электричества он должен был устремиться прочь от катушки, охлаждая воду вокруг.

Случилось обратное. Катушка не остыла, а нагрелась. Более того, чем активнее Джоуль крутил рукоятку динамо и чем больше тока вырабатывал, тем теплее становилась вода вокруг катушки. Казалось, это электричество, выходящее из динамо-машины и проходящее по ней, производило теплоту, а не динамо-машина перемещала теплород из одного места в другое.

Чтобы лучше разобраться в этом, Джоуль подсоединил к динамо-машине батарею. Пока машина не работала, электричество от батареи проходило по катушке и нагревало ее.

Это было вполне ожидаемо, ведь Джоуль давно заметил, что ток от батареи нагревает провода. Более важная вещь произошла, когда Джоуль запустил динамо-машину, не отсоединяя батарею. Если он вращал рукоятку в одну сторону, например по часовой стрелке, то вырабатываемый ток прибавлялся к току, идущему от батареи, и температура воды вокруг катушки поднималась сильнее, чем когда динамо-машина оставалась в покое. Если же он вращал рукоятку в другую сторону, против часовой стрелки, то вырабатываемый ток шел в направлении, противоположном направлению тока от батареи. Температура воды все равно повышалась, но менее существенно. Складывалось впечатление, что электрический ток, вырабатываемый динамо-машиной, уничтожает часть теплоты, производимой током, идущим от батареи.

Следствия этого для Джоуля были очевидны. Он с уверенностью написал: “Таким образом, магнитоэлектричество представляет собой агент, способный простым механическим способом уничтожать или производить теплоту”.

По мнению Джоуля, процесс работы его экспериментальной установки был двухступенчатым. Сначала работа по вращению динамо генерировала электричество, а затем идущий по проводам электрический ток давал тепло. Это значит, что истинным источником теплоты в такой системе была работа, а электричество выступало лишь посредником.

На следующем шаге Джоуль попытался провести количе-

ственную оценку этого процесса. Если работу можно преобразовывать в теплоту, то сколько работы необходимо для выработки заданного количества теплоты? В представлении Джоуля работа и теплота стали взаимопревращаемыми, как доллары и фунты. И доллары, и фунты – это виды валюты, поэтому, зная обменный курс, можно понять, сколько долларов дают за один фунт. Джоуль полагал, что существует “обменный курс” для работы и теплоты. Назвав его “механическим эквивалентом теплоты”, он задался целью определить его величину.

Для этого Джоуль с помощью веревок и блоков подсоединил динамо-машину к опускающемуся грузу. Опускаясь, груз поворачивал динамо, что сначала приводило к выработке электричества, а затем и теплоты, которая, как и раньше, нагревала трубку с водой. Теперь Джоуль мог приравнять высоту, с которой опускался груз определенной массы, к количеству вырабатываемой теплоты. Иными словами, у него появился способ измерить механический эквивалент теплоты.

Джоуль принял за “единицу теплоты” количество теплоты, необходимое для нагревания 1 фунта воды на 1 °F. За единицу работы он принял работу, совершаемую, когда груз массой 1 фунт опускается на 1 фут, и назвал эту меру фут-фунт. На протяжении нескольких недель Джоуль с огромной скрупулезностью проводил различные варианты своего эксперимента. Процесс был хлопотным и сложным – не в по-

следнюю очередь потому, что теплота от электрического тока повышала температуру воды в трубке максимум на 3 °F, что едва фиксировалось имеющимся в распоряжении у Джоуля термометром. Кроме того, Джоулю сложно было изолировать аппарат таким образом, чтобы температурные изменения происходили исключительно под действием электрического тока, генерируемого динамо-машиной, а не объяснялись колебаниями температуры в лаборатории.

Через несколько недель экспериментов Джоуль пришел к выводу, что полученные результаты заслуживают доверия. Более того, они показывали, что действительно существует фиксированный “обменный курс” работы и теплоты. Назвать его точно было сложно – судя по всему, он составлял от 750 до 1000 фут-фунтов на единицу теплоты, – поэтому Джоуль определил среднее значение на основе всех снятых показаний.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.