

УДК 536
ББК 22.3г
Б88

Бродянский В. М. Сади Карно — основатель термодинамики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 184 с. — ISBN 5-9221-0397-0.

Книга посвящена жизни и деятельности С. Карно — великого французского физика и инженера, основоположника термодинамики. Идеи его классического труда «Размышления о движущей силе огня . . .» не только определили научную базу энергетики всего последующего времени, но и оказали существенное влияние на развитие физических наук. В книге использованы малоизвестные документы, а также работы Карно, не опубликованные при его жизни.

Для широкого круга читателей, интересующихся наукой, техникой и историей.

This book is devoted to the life and activities of S. Carnot, the great French scientist and engineer, the founder of thermodynamics. The ideas of his classic work «Reflexions sur la puissance motrice du feu . . .» constitute the scientific basement of modern energetics and influenced essentially the progress of Physics as a science. Some little-known documents and S. Carnot's works unpublished during his life, are discussed in this book.

The book is intended for all those who is interested in thermodynamics and its applications to various fields of science and engineering.



C. Conner

Предисловие к первому изданию

Наиболее замечательные и совершенные произведения человеческого духа всегда несут на себе отпечаток творца, а через него и своеобразные черты народа, страны и эпохи. Это хорошо известно в искусстве. Но такова же и наука...

С. И. Вавилов

В 1824 г. парижский издатель Башелье напечатал за счет автора тиражом 600 экземпляров небольшую книжку некоего капитана инженерных войск Сади Карно. Она называлась “Размышления о движущей силе огня и машинах, развивающих эту силу”.

Выход книги прошел почти незамеченным.

“Большая наука” Франции, которую представляли Институт Франции (Академия наук) и знаменитая Политехническая школа, по существу, не отреагировали на появление работы С. Карно. Только через 10 лет, когда Э. Клапейрон переиздал его книгу со своими комментариями и дополнениями, она стала оказывать все возрастающее влияние на ход развития науки. Но это произошло уже после смерти автора, который скончался в 1832 г.

В маленькую книжку С. Карно уходят корни фундаментальных работ У. Томсона (Кельвина), Р. Клаузиуса и, в конечном счете, всей новой науки — термодинамики со всеми ее многочисленными ответвлениями. К ней вполне применимы слова А. А. Фета о сборнике стихов Ф. И. Тютчева: “...эта книжка небольшая томов премногих тяжелей.”

Начиная с последней четверти XIX в. книжка С. Карно многократно комментируется, цитируется и издается на многих языках во всем мире, а С. Карно становится общепризнанным классиком науки. Без упоминания цикла Карно, коэффициента Карно, теоремы Карно, КПД Карно и других основополагающих представлений, связанных с его именем, не обходится ни один современный учебник физики, не говоря уже о термодинамике, теплотехнике, холодильной технике и химической технологии.

На этом фоне странно выглядит то обстоятельство, что Сади Карно, пожалуй, единственный классик науки, достаточно полная биография которого до сих пор не создана. В отличие от многих, существенно менее значительных деятелей, которым посвящены книги и многочисленные исследования, С. Карно не удостоился ни одной специальной монографии, посвященной его жизни и деятельности, даже на его родине — во Франции, не говоря уж о других странах.

Одна из причин здесь несомненно связана с тем, что жизнь С. Карно была очень короткой — всего 37 лет — и не изобиловала внешне примечательными событиями. Источники, из которых можно почерпнуть информацию для его биографии, очень ограничены.

Во Франции определенную роль сыграло весьма своеобразное обстоятельство, связанное с семьей С. Карно. Дело в том, что ряд представителей семьи Карно занимают важное место в истории Франции на одном из ее самых бурных этапов — с последней четверти XVIII в. и почти до конца XIX в.

Самый знаменитый в этой семье — Лазар Карно (1753–1823) — отец С. Карно, известный как “великий Карно” (Carnot le Grand) — математик, механик, военный инженер и государственный деятель. Л. Карно был одной из ведущих фигур Великой французской революции, членом Конвента и Комитета общественного спасения. Ему, создавшему 14 революционных армий, отразивших натиск европейской реакции, было присвоено почетное звание “организатор победы”.

Рядом с этой крупной исторической фигурой его рано умерший старший сын, проживший короткую, не содержащую внешне ярких фактов жизнь, оказался отодвинутым на задний план.

Младший брат С. Карно — Ипполит (1801–1888) тоже представлял собой заметную фигуру в политической жизни Франции. Он был министром просвещения во Временном правительстве после революции 1848 г., автором проекта о всеобщем начальном образовании.

Сын Ипполита — С. Карно-младший (1837–1894), внук “организатора победы”, названный Сади в честь своего дяди, получив по семейной традиции инженерное образование, стал, как и отец, видным политическим деятелем. В период 1887–1894 гг. он был президентом Франции; убит итальянским анархистом в 1894 г.

Отдавая должное всем известным представителям семьи Карно, в особенности Л. Карно¹⁾, будет вполне справедливо при их исторической оценке выдвинуть на первый план фигуру его гениального (в полном, неискаженном смысле этого слова) сына — Сади Карно. Может быть, в словах У. Томсона-Кельвина, назвавшего работу С. Карно “величайшим научным трудом XIX века”, и есть некоторое преувеличение, но “одним из величайших” его назвать можно уверенно.

Описание жизни С. Карно, научный анализ его работы “Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу” и “Записок”, опубликованных после смерти автора, представляют интерес для современного читателя в нескольких аспектах. Прежде всего, короткая жизнь С. Карно — это классический пример научного подвига; его трудная судьба не помешала создать основу целой науки и намного опередить современников. Очень важно также и то, что

¹⁾ Известный французский энциклопедический справочник “Лярусс” выпуска 1918 г. даст краткие биографии трех Карно: Лазара, Ипполита и Сади-младшего. С. Карно даже не упоминается. В последующих изданиях эта ошибка исправлена, но статья очень коротка и малоинформативна.

жизнь и творчество С. Карно совпали с тем этапом промышленной революции, с которым связано бурное развитие тепловых двигателей. Отсюда сочетание в работе С. Карно высокого уровня теории с практической инженерной направленностью. Этот аспект труда Карно, как и его экономические воззрения, не анализировался до сих пор в нужной степени.

Существенная особенность биографии С. Карно связана и с тем, что он был не только сыном крупного деятеля революции. Он и в более широком смысле был “сыном революции” и оставался им в самые мрачные времена реакции, последовавшей за реставрацией Бурбонов. Верный заветам отца, он всегда был непоколебимым республиканцем, противником королевской власти и всякого деспотизма, человеком самых прогрессивных взглядов.

Чрезвычайно поучительна история отношений С. Карно с научной средой его времени, а также дальнейшего развития его фундаментальных идей и борьбы, развернувшейся вокруг них. Полемика касалась прежде всего положений, относящихся к трактовке второго начала термодинамики и понятия энтропии. О философском значении работы С. Карно и связанной с ней дискуссии об энтропии и “тепловой смерти” Вселенной писали Ф. Энгельс, Л. Больцман, А. Эйнштейн.

Запоздавшее опубликование братом Ипполитом записок С. Карно (почти через полвека после его смерти) показало, что он задолго до Р. Майера и Дж. Джоуля четко сформулировал закон сохранения энергии в форме, соответствующей первому началу термодинамики, и даже более точно, чем Р. Майер, определил значение механического эквивалента теплоты.

Наконец, большой интерес представляет современное развитие некоторых направлений “королевы наук” — термодинамики, в которых прослеживаются традиции, заложенные еще С. Карно, и дискуссии, происходившие в связи с ними.

Предлагаемая вниманию читателей научная биография С. Карно построена таким образом, чтобы все перечисленные выше направления нашли в ней по возможности свое отражение.

Значительное место в книге уделено сложной исторической обстановке времени жизни С. Карно и тем людям, которые либо непосредственно оказали на него существенное влияние, либо играли значительную роль в событиях, прямо или косвенно с ним связанных. В частности, большое внимание уделено семье Карно, в особенности его отцу, роль которого в формировании научных взглядов и стиля работы С. Карно трудно переоценить. Определенное место отводится Политехнической школе, в которой он учился, условиям военной службы и т.д. Кроме этого, уделяется внимание как некоторым аспектам физических теорий, так и тепловым двигателям того времени. В частности, рассмотрены работы шотландского пастора Р. Стирлинга, который независимо от Карно подошел к чисто практическим позициям к некоторым аналогичным выводам. Без всего этого нельзя дать достаточно полное

представление ни о самом С. Карно, ни об обстановке, в которой формировались его взгляды, создавались книга “Размышления о движущей силе огня...” и опубликованные впоследствии научные записки.

В конце книги приведены даты событий жизни и деятельности С. Карно с дополнениями, дающими хронологическую канву развития его идей, а также библиография работ о нем. Большая часть этих работ относится к анализу отдельных положений труда С. Карно. Количество работ, посвященных непосредственно жизни и деятельности С. Карно, как уже упоминалось, относительно невелико. На русском языке, если не считать немногих журнальных публикаций (наиболее содержательна из них статья А. А. Радцига, опубликованная в “Архиве истории науки и техники”), известна только брошюра Л. З. Фрадкина “Сади Карно, его жизнь и творчество”, вышедшая в 1932 г. (к столетию со дня смерти). В зарубежной литературе, в том числе и французской, книг о С. Карно нет; имеются лишь ряд журнальных статей и весьма содержательный сборник докладов конференции в Политехнической школе, посвященной памяти С. Карно (1974). Некоторые сведения, относящиеся к биографии С. Карно, содержатся в воспоминаниях его младшего брата И. Карно, опубликованных в приложении к переизданию книги “Размышления о движущей силе огня...”, вышедшей в 1927 г. в Париже. Остальные сведения, в особенности относящиеся к семье Карно, разбросаны по различным мемуарам и историческим работам. Кроме этого имеется ряд статей на английском и французском языках, которые также включены в библиографию.

В работе использованы (трактовка воззрений Карно и подход к развитию его положений у Кельвина и Клаузиуса) некоторые идеи и советы профессора А. А. Гухмана и трактовка у Карно теплофизических свойств газов профессора В. В. Сычева, которые постоянно оказывали поддержку автору в его работе, за что он приносит им глубокую благодарность. В книге учтены также полезные замечания профессора Д. Л. Тимрота. Особо признателен автор редактору Ленинградской публичной библиотеки им. Салтыкова-Щедрина О. В. Звезгинцевой за помощь в библиографическом поиске.

Второе издание в основном сохраняет содержание и последовательность изложения первого издания.

Вместе с тем в текст внесены некоторые дополнения, связанные как с новыми материалами, так и с пожеланиями и замечаниями читателей, которым автор приносит свою благодарность. Пополнен также иллюстративный материал. Учтены также пожелания, высказанные в журнальных рецензиях на первое издание книги, а также на научных заседаниях, посвященных 200-летию со дня рождения С. Карно.

Глава 1

Семья Карно

Революция и империя (1753–1817)

Семейные корни

Чтобы полнее понять “труды и дни” выдающегося человека, его мировоззрение, характер и творчество, нужно начинать с корней — семьи, ближайшего окружения и, наконец, внешней обстановки. Такой подход особенно необходим при изучении биографии Сади Карно, с детства находившегося в кругу выдающихся людей, которые и в политике и в науке непосредственно “делали историю”; одно из первых мест среди них занимал его отец — Лазар Карно. И это была история Великой французской революции и полной бурных всемирно-исторических событий первой трети последующего XIX века!

Юные годы С. Карно пришлось на достаточно беспокойную эпоху — консульства и империи Наполеона, а зрелые — на время реставрации Бурбонов и революцию 1830 г.

Вплоть до последних дней жизни Л. Карно (он умер в 1823 г.) его связывала с сыном тесная дружба. Отец был для сына образцом во всем; преемственные связи, соединяющие их, ясно прослеживаются в характерах, политических взглядах, отношениях к искусству и науке. При анализе научных работ отца и сына возникает мысль о некоем единстве: Сади Карно продолжил, развил и применил к новым, несравненно более сложным задачам те идеи и методы, которые были разработаны его отцом. Поэтому понять достаточно полно замечательный труд С. Карно и его место и науке без анализа жизни и работы его отца невозможно.

У деда С. Карно, адвоката из небольшого города Нолэ¹⁾ (графство Бургонь), было 18 детей, воспитанию и обучению которых уделялось большое внимание. Самым талантливым был родившийся в 1753 г. Лазар Никола Маргерит — будущий “организатор победы”. Братья и сестры Лазара тоже проявили незаурядные способности: один брат впоследствии стал генералом французской армии, другой — генерал-прокурором, а одна из сестер — директрисой богадельни.

¹⁾ Эти места расположены недалеко от Кламси — города, в котором жил знаменитый бургундец Кола Брюньон — герой книги Р. Роллана.

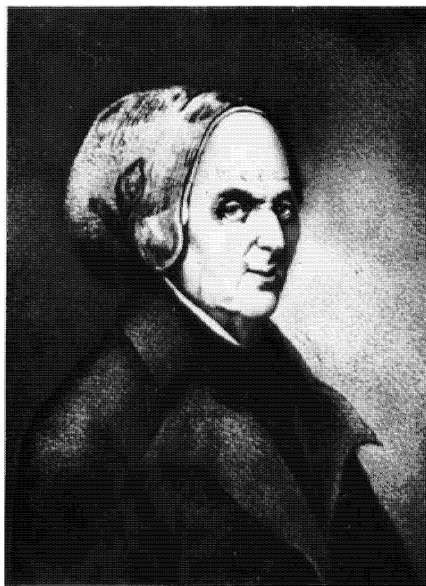


Рис. 1. Дед С. Карно — адвокат Д. Карно

проявлялись у юного Лазара Карно и во время учения в Отенской коллегии, после которой он перешел в семинарию. Окончание семинарского курса было связано с характерным эпизодом. По установившемуся обычаю ученик должен был публично защищать подготовленные им тезисы; при этом любой посетитель имел право задавать вопросы и участвовать в обсуждении. Чтобы помочь ученику, к нему обычно приставлялся ментор, который мог поддержать подсказкой юного оратора в трудной ситуации и даже вступить в дискуссию на его стороне. Шестнадцатилетний Лазар заявил, что ему суфлер не нужен и, если его не оставят одного, он откажется от диспута. Защита прошла блестяще.

После окончания семинарии встал вопрос о дальнейшей карьере. В семье, где было много лиц духовного звания, Лазару советовали вступить в один из монашеских орденов. Самого Карно больше привлекала военная служба, но в дореволюционной Франции путь в офицерскую школу для представителя третьего сословия был закрыт. Офицером мог быть только дворянин. Единственным исключением была знаменитая высоким уровнем преподавания (одним из преподавателей там был, например, Г. Монж ¹⁾) Мезьерская школа военных инженеров.

¹⁾ Гаспар Монж (1746–1818) — математик, механик и общественный деятель, член французской академии, основоположник начертательной геометрии. Автор ряда классических работ в области аналитической и дифференциальной геометрии, а также математического анализа.

Военный талант Лазара Карно, как утверждает семейное предание, проявился довольно рано. Однажды, когда ему было 10 лет, мать привела его в театр. На сцене шло сражение: войско во главе с генералом ведет осаду крепости. Вдруг мальчик, сидевший до этого спокойно, вскочил и, несмотря на попытки матери остановить его, закричал генералу: “Вы плохо разместили артиллерию, канониры ваши открыты, их перестреляют с валов крепости. Подвиньте их вон за ту скалу!” Это происшествие в Дижонском театре говорит о том, что будущий “организатор победы” уже в юном возрасте мог не только критиковать, но и быстро находить правильное решение.

Самостоятельность характера и оригинальность мышления

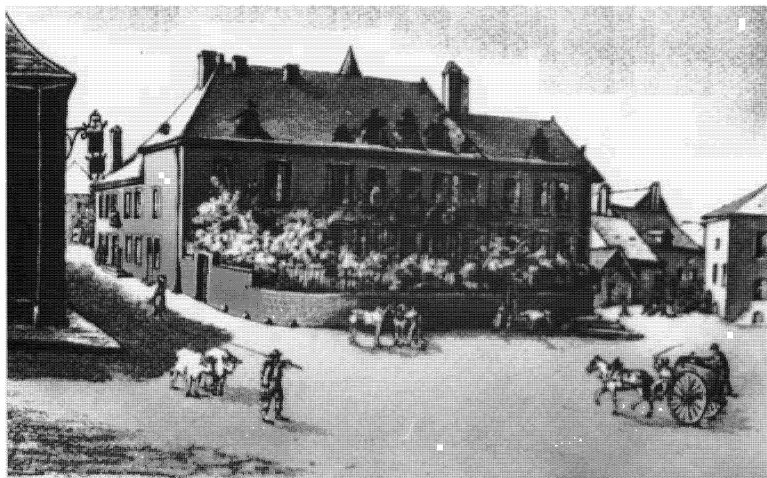


Рис. 2. Дом семьи Карно в Нолэ

Инженерное искусство в старой Франции (да и не только в ней) считалось занятием малопрестижным. Поэтому поступающие в эту школу не должны были подтверждать свое дворянское происхождение, но при этом нужно было доказать, что ни отец, ни мать абитуриента не занимаются торговлей или ремеслами. Адвокату Карно удалось защитить репутацию свою и жены от подозрений в столь низменных делах: их сын в 1771 г. был принят в Мезьерскую школу. Экзамены он выдержал с блеском, готовился он к ним в Париже.

Окончив Мезьерскую школу в 1773 г., Л. Карно получил чин поручика и был направлен в морскую крепость Кале. Служба молодого офицера проходила вполне успешно, хотя он слыл среди товарищей оригиналом из-за того, что часто предпочитал общение с книгой общению с бутылкой. Сослуживцы даже прозвали его философом, однако это не мешало их дружеским отношениям, тем более что к службе и долгу военного инженера Л. Карно относился очень серьезно. В его записях, датированных примерно этим временем, есть такие слова: «Инженер всегда в опасности; он должен смотреть на смерть хладнокровно. Он не спешит ей навстречу, как пехотный командир — она сама приходит к нему. Он всегда должен быть там, где раздастся гром. Но он не управляет им; он наблюдает его для того, чтобы своим искусством сохранять других, не думая о собственной безопасности». Эти прекрасные слова в полной мере могут быть «взяты на вооружение» любым современным военным инженером.

Первое известное упоминание о тяготении Карно к науке относится к 1783 г. Оно связано со всеобщим интересом к аэростатам, охватившим Францию после первого полета воздушного шара братьев Монгольфье. Карно подал в Академию наук записку о применении аэростатов в военном деле и управлении ими. Дальнейшая судьба этой записки неизвестна, но нужно отметить, что впоследствии, когда Л. Карно был

членом Комитета общественного спасения, его идея была реализована. Республиканский генерал Морло, поднявшись на воздушном шаре, произвел разведку позиций противника; это в значительной степени способствовало победе над войсками интервентов при Флерюсе.

В том же 1783 г. одна из провинциальных научных академий — Дижонская (“дочь Французской академии”, как она себя называла) объявила конкурс на лучшее сочинение о С. Вобане ¹⁾. Выбор этой темы во многом объяснялся тем, что маршал, как бургундец, был особенно популярен в этой области Франции.

Сочинение Л. Карно “Похвальное слово Вобану” было удостоено первой награды и издано (это был его первый опубликованный труд). В нем молодой офицер смело высказывался против порядков, установленных королевской властью во Франции. Кроме похвал военному и инженерному искусству маршала, который был образцом для автора, он хвалил его за тот самый крамольный труд о королевской десятине, за который старый маршал лишился милостей короля Людовика XIV. Карно не только соглашается с Вобаном, возмущавшимся обиранием народа, называвшим налоговую систему во Франции “варварской”, а сбор налогов — “грабежом”. Молодой автор идет дальше: он пишет о необходимости “разделить имущество богатых между бедными”. Отношение к правящим первому (духовенству) и второму (дворянству) сословиям он показывает достаточно образно, считая, что привилегированные классы — бремя для народа (т. е. третьего сословия) и “становятся полезными только после своей смерти, так как удобряют землю своими трупами”. Тут уже явно чувствуется будущий и весьма радикальный деятель революции. Интересно, что на заседании, где Л. Карно вручалась премия за это сочинение, председательствовал губернатор провинции, член королевской фамилии — принц Конде.

Работа над сочинением о Вобане не помешала исследованиям Карно в областях его основных научных интересов — механики и математики. В 1783 г. вышел из печати его первый труд по механике “Опыт о машинах вообще” ²⁾.

Этот труд Л. Карно требует несколько более подробного рассмотрения не только потому, что он важен сам по себе как первое в истории механики исследование по динамике машин. Не менее, а для нашей цели и более важно, что заложенные в нем идеи оказали решающее

¹⁾ Вобан (Vauban) Себастьян ле Претр Де (1633–1707) — знаменитый французский военный деятель, инженер и экономист. С 1703 г. маршал Франции. Построил 33 и реконструировал 300 крепостей, участник нескольких десятков сражений. Был противником Нантского эдикта Людовика XIV (об изгнании гугенотов из Франции). В сочинении “Projet de une dime royale” (“Проект королевской десятины”) критиковал налоговую систему Франции и дал проект ее радикального изменения. По постановлению парламента (высшей судебной инстанции) книга была сожжена, а ее автор подвергнут опале.

²⁾ В 1803 г. после доработки он был переиздан в Париже под названием “Основные принципы равновесия и движения”.

влияние на формирование методов, которые применил в своем знаменитом мемуаре “Размышления о движущей силе огня...” его сын С. Карно. Если пользоваться терминологией Л. Карно, то “Размышления о движущей силе огня...” можно было бы с полным правом по аналогии назвать “Опыты о тепловых машинах вообще”. Само название книги “О машинах вообще” поднимало механику на качественно новый уровень: впервые исследовались не отдельные определенные машины, а машины вообще. Этим Л. Карно ввел представление о предельно идеализированной механической машине и тем самым поставил вопрос о ее обобщенном изучении, освобожденном от необходимости учета любых второстепенных факторов.

На этой основе родилась теорема Л. Карно о сохранении “живых сил”. Эта теорема, если излагать ее в современных терминах, гласит: “Кинетическая энергия, потерянная системой при абсолютно неупругом ударе, равна той кинетической энергии, которую имела бы система, если бы ее точки двигались с потерянными скоростями”. Соответствующее уравнение:

$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 - \frac{1}{2} \sum_i m_i u_i^2 = \frac{1}{2} \sum_i m_i (v_i - u_i)^2, \quad (1)$$

где m_i — массы точек системы; v_i и u_i — их скорости в начале и конце удара (разность $v_i - u_i$ — потерянная скорость).

Нетрудно видеть, что основа этой формулы — закон сохранения энергии; но вывести ее можно было, только введя понятие об *абсолютно неупругом ударе*. Именно введение этой абстракции (в реальных условиях такой удар нереализуем) дало возможность получить закон в чистом, неискаженном виде. Именно этот метод максимальной идеализации, только на качественно более высокой ступени, применил через 40 лет уже к тепловой машине старший сын Л. Карно. Так появилась теорема С. Карно — о независимости коэффициента преобразования тепловой машины от свойств рабочего тела. О ней речь впереди; важно только подчеркнуть преемственность методики исследования, которая привела к теоремам Карно. Лучше всего об этом написал Ф. Энгельс в “Диалектике природы”, говоря о работе младшего Карно: “Он изучил паровую машину, проанализировал ее, нашел, что в ней основной процесс не выступает в чистом виде, а заслонен всякого рода побочными процессами, устранил эти побочные для главного процесса обстоятельства и сконструировал идеальную паровую машину... Она представляет рассматриваемый процесс в чистом, независимом, неискаженном виде”¹⁾.

Если заменить в этой цитате “паровую” на “механическую”, то все, о чем писал Энгельс, в полной мере можно отнести и к старшему Карно, который сделал это впервые.

Несколько страниц в книге “О машинах вообще” Л. Карно посвятил проблеме вечного двигателя, доказывая на основе своей теоремы, что

¹⁾ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Т. 20. С. 543.



Рис. 3. Мать С. Карно — Софи Карно (Дюпон)

енным округом. Она прошла с ним большую часть его трудного жизненного пути и скончалась в 1813 г. (за 10 лет до смерти мужа).

Лазар Карно — “организатор победы” революционной Франции

В полном событий 1791 году начинается активная политическая и военно-политическая деятельность 39-летнего капитана инженерных войск Л. Карно. Он избирается депутатом Национального собрания от департамента Па-де-Кале. Этому высокому человеку со спокойными серыми глазами, сдержанными манерами и военной выправкой суждено было четверть века почти непрерывно играть одну из ведущих ролей в истории Франции.

К моменту прибытия Л. Карно в Париж революция прошла уже большой путь, однако главное было еще впереди.

Поражения в войне с Австрией и манифест герцога Брауншвейгского, грозившего восстановить законную власть короля, подвергнуть Париж разрушению, а народ экзекуции, вызвали взрыв негодования: 10 августа 1792 г. восставший народ взял штурмом королевский дворец — Тюильри; 20 августа открылось заседание Конвента, провозгласившего Францию республикой. Карно был в числе его депутатов, а затем одним из комиссаров Конвента в действующей армии. Здесь

такая машина не может постоянно производить работу и непременно остановится. И эта идея займет важное место в книге его сына.

Научные занятия Л. Карно не прерывали его служебной карьеры. Он получил чин капитана и был переведен в гарнизон г. Сент-Омера.

Между тем политическая обстановка в стране накалялась: близилось начало революции. Наконец, наступил 1789 г. — открытие Генеральных штатов, взятие Бастилии, принятие “Декларации прав человека и гражданина”, неудавшееся бегство короля; в 1791 г. — утверждение республиканской конституции. Достаточно радикальные политические взгляды Л. Карно и решительный характер не могли оставить его безучастным ко всем этим событиям. Но жизнь шла своим чередом: в 1791 г. Карно женится на Софи Дюпон, дочери командующего военным округом. Она прошла с ним большую часть его трудного жизненного пути и скончалась в 1813 г. (за 10 лет до смерти мужа).

он показал не только личное мужество, но и способность отстаивать правду в сложных ситуациях, противостоять любому давлению и демагогии, как, например, в истории с мукой для резервной армии. По Парижу пошел слух, что в Суассоне некие диверсанты подмешивают в муку стекло, и тысячи человек из-за этого пострадали. Народ, подстрекаемый демагогами, требовал казней. Комиссаром для проведения следствия был послан Карно; он установил, что слухи были ложными. Оказалось, что на один мешок с мукой упало несколько кусков стекла от разбитого церковного окна (мука хранилась в церкви).

В январе 1793 г. состоялся суд над королем; 387 депутатов (из 721), в том числе и Л. Карно, голосовали за смертную казнь Людовику XVI.

К весне 1793 г. обстановка внутри страны и на фронтах усложнилась до крайности. В марте восстала Вандея, и 40 тысяч мятежников угрожали Туру, Мансу и осаждали Нант. Крупные города — Марсель, Кан, Лион — не подчинялись правительству. Изменил командующий северной армией Дюмурье, и остатки его войск отступали; с юга две испанские армии вступили во Францию; 20 тысяч итальянцев (пьемонтцев) перешли Альпы. Англичане заняли Тулон и установили морскую блокаду Франции. Из 83 департаментов 60 были охвачены мятежом.

Вся Европа — Англия, Пруссия, Австрия, Голландия, Испания, германские и итальянские государства, составив контрреволюционную коалицию, шли усмирять революционную Францию.

Комитет общественного спасения из 9 человек, возглавляемый Дантоном, декретированный Конвентом в марте, не был достаточно решительным в борьбе с внешней и внутренней контрреволюцией и стремился к компромиссу (Марат назвал этот комитет “комитетом общественной гибели”). Но революция нашла новые силы. В июне была утверждена другая якобинская конституция — самая демократическая в XIX в.; в июле Конвент переизбрал Комитет общественного спасения, Дантон был устранен. В комитет были введены Сен-Жюст и Кутон, а затем Робеспьер и в августе — Л. Карно, как “военный инженер с выдающимися организационными способностями”. Так был создан второй “Великий комитет” общественного спасения (КОС), который возглавил “революционную расправу” над остатками феодализма в стране и разгром внешних врагов революции. Роль Л. Карно в решении второй из этих задач была решающей.

В соответствии с распределением обязанностей Л. Карно занимался в КОС совместно с Сен-Жюстом военными делами и совместно с Приером снабжением и вооружением армии. Все, что Л. Карно сделал на своем посту, трудно переоценить. Здесь и организация армий, подбор и выдвижение нового командного состава, подготовка планов кампаний, контроль хода военных операций (иногда с личным участием в их проведении), выработка новой стратегии и тактики, производство оружия и боеприпасов, организация транспорта...

При решении всех этих вопросов Карно проявлял не только качества организатора и стратега. Во всех его действиях постоянно вырисовывался стиль человека науки, который, принимая решение, опирался на

объективный всесторонний анализ ситуации, на научные знания и способности — как свои, так и других, — когда это было необходимо. Для этого при КОС был создан конгресс (комиссия) ученых, в котором были представлены специалисты по точным и естественным наукам. Они быстро и квалифицированно готовили нужные технические решения. Например, производство пороха и других необходимых химических продуктов возглавил Бертолле, литье пушек — Монж. Были срочно организованы курсы для подготовки технических кадров, где кроме Бертолле и Монжа преподавали Перрье и Лагранж.

Чтобы восполнить недостаток командного состава, Карно еще в 1792 г. предложил заменить дезертировавших офицеров-дворян сержантами. В результате революционная армия получила целую плеяду талантливых и надежных командиров; некоторые из них быстро превратились в крупных полководцев. Один из таких сержантов — Гош — составил и подал по команде записку “О средствах проникнуть в Бельгию”. Карно поддержал его и сказал: “Этот сержант проложит себе дорогу”. За несколько месяцев бывший конюх Гош стал капитаном, затем полковником и, в возрасте 21 года, одним из самых талантливых генералов республики — командующих армиями.

Карно постоянно следил за успехами и неудачами своих молодых полководцев, всячески поддерживал и направлял их как в военных делах, так и в политических. После неудачи под Кайзерлаутерном он написал Гошу: “Неудача — еще не преступление, когда нужно одержать победу”. Тому же Гошу, посланному на подавление мятежа в Вандею: “Надо убеждать и просвещать, но не прибегать к насилию”.

Л. Карно вопреки мнению большинства якобинцев провел “амальгаму” — слияние частей старой королевской армии с революционными батальонами волонтеров. Он организовал войска в дивизии, которые представляли собой не временные образования, как до этого, а постоянно существующие маневренные соединения трех родов войск — пехоты, артиллерии и кавалерии.

В результате деятельности КОС массы необученных солдат, лишенных всего необходимого, были превращены в 14 армий общей численностью около 600 тысяч человек, обученных новой тактике, снабженных оружием и боеприпасами. Производство ружей, например, возросло по сравнению с дореволюционным в 5 раз. Результаты всех этих мер сказались уже осенью 1793 г.: 25 августа был освобожден Марсель, 9 октября — Лион; за этим последовал еще ряд побед. Наконец 26 июня 1794 г. в битве при Флерюсе республиканская армия под командованием Журдана одержала решающую победу над войсками коалиции ¹⁾.

¹⁾ Подробно деятельность Л. Карно в то время описана как в исторической литературе, посвященной Великой французской революции, в частности в “Истории французской революции”, написанной его младшим сыном И. Карно (*Карно И.* История французской революции. СПб., 1893), так и в многочисленных мемуарах (см. “Список литературы” в конце книги).

К середине 1794 г. высшая точка революции была пройдена; революция сделала свое дело — уничтожила феодализм и отстояла страну от интервентов. В 1794 г., 9 термидора (27 июля), произошел контрреволюционный переворот, и к власти пришла новая буржуазия. Карно непосредственно не участвовал в термидорианском заговоре, хотя и не разделял политических позиций Робеспьера и Сен-Жюста во время якобинского террора (и не скрывал этого). В апреле 1794 г. на заседании КОС он открыто обвинил их в стремлении к диктатуре. Нужно отметить, что Робеспьер всегда относился к Карно с предубеждением, хотя и признавал его способности. В одной из речей он сказал в адрес Карно так: “Захватить все военные операции — дело ненавистного эгоизма; упорно не вмешиваться во внутреннюю политику — значит уживаться с врагами народа”. Несмотря на столь тяжелое обвинение, Робеспьер понимал, что устранить такого военного специалиста (во всяком случае теперь) нельзя. Позиция Робеспьера очень ясно раскрывается в словах, которые он однажды сказал Камбону, выражая сожаление, что “ничего не понимает и не может разобрать на военных планах и картах”. “Если бы в молодости я выучился военному искусству, то теперь не был бы должен уступать ненавистному Карно, когда дело идет о наших армиях”.

Но Робеспьер не дожил до того времени, когда можно было бы избавиться от “ненавистного Карно”. После переворота КОС превратился в ведомственный комитет, занимавшийся внешней политикой и армией. Карно, который в последний период существования КОС уже не участвовал в его работе, был включен в новый комитет; как и прежде, он ведал военными вопросами — без него обойтись не могли.

Осенью 1795 г. термидорианский Конвент выработал новую конституцию, по которой всеобщее избирательное право было отменено, введен высокий имущественный ценз и двухстепенные выборы. Палата депутатов теперь состояла из Совета пятисот и Совета старейшин (250 человек старше 40 лет). Исполнительная власть передавалась Директории из 5 человек с заменой одного из них каждый год. Л. Карно был выбран одним из директоров и в этом качестве продолжал руководить военным ведомством. Наступило время Директории, продолжавшееся до конца 1799 г.

Прежде чем перейти к драматическим событиям в жизни Л. Карно, относящимся к этому периоду, необходимо остановиться на его деятельности в области реформы научных учреждений и образования во Франции. Несмотря на все трудности и жестокую внутривнутриполитическую борьбу в правящем лагере, в 1793–1795 гг. в этом направлении была проделана огромная работа. В 1793 и 1794 гг. Конвент четыре раза заслушивал сообщения Карно и Приера о работах ученых. Как писал позже Стендаль, “то было самое прекрасное время в истории народного просвещения”.

Одной из задач преобразований, проведенных в то время, было обеспечить подготовку гражданских и военных инженеров, а также преподавателей высшей квалификации. В 1794 г., 11 марта, по решению Конвента, подготовленному и принятому при активном участии

Л. Карно, Г. Монжа и других ведущих ученых, была учреждена знаменитая в дальнейшем Политехническая школа, предназначенная для решения первой из этих задач, и Нормальная школа — для второй.

Политехническая школа воспитала целую плеяду выдающихся инженеров и ученых, в том числе и С. Карно. К роли этой школы в его жизни мы еще не раз вернемся в дальнейшем.

Первым директором Политехнической школы был назначен Г. Монж (1746–1818). Это было учебное заведение совершенно нового для того времени типа, где будущим инженерам давалась общая фундаментальная подготовка, в особенности по математике, физике и химии. Прием проводился строго по конкурсу. Каждый учащийся получал стипендию 1200 франков в год. Было предусмотрено, что после трехлетнего обучения в Политехнической школе ее выпускники должны были завершать образование в других высших специальных технических школах — Мостов и дорог, Горной, Артиллерийской и т. д. Об уровне Политехнической школы можно судить по тому, что среди ее преподавателей были Ж. Лагранж, П. Лаплас, С. Пуассон, А. Лежандр. Политехническая школа во многом продолжила традиции Мезьерской школы, которую закончил Л. Карно.

В 1795 г. был основан Национальный институт наук и искусств, объединивший все три существовавшие при королевской власти академии — Академию наук (точные и естественные науки), Французскую академию (литература) и Академию надписей (история, лингвистика). В число членов института (по-старому — академиков) вошли все крупные ученые и инженеры Франции, а том числе и Л. Карно (в класс физико-математических наук).

Между тем внутривластная обстановка в Франции становилась все более беспокойной. Продажная Директория (“режим, управляемый собственниками”), во главе которой стояли люди типа Барраса, думавшие только об обогащении своем и поддерживающих их групп буржуазии, и которая лавировала между умеренно левыми и правыми, все больше скатывалась к произволу и беззаконию и теряла остатки авторитета в стране.

Честность Карно и его приверженность республиканским идеалам, отказ от каких-либо интриг вызывали недовольство в правящих кругах. Но это уже была оппозиция не слева, как во времена Робеспьера, а справа, со стороны реакционного большинства Директории. Тем не менее заменить его пока было нечем, и Карно продолжал работать, стараясь среди всеобщего развала поддерживать порядок в армии.

К тому времени (1796 г.) относятся два важных события в жизни Л. Карно: первая встреча с молодым генералом Наполеоном Бонапартом, будущим императором Наполеоном, и рождение старшего сына, названного Николаем Леонардом Сади Карно, будущего классика науки, основателя термодинамики.

Лазар Карно, Наполеон Бонапарт и наука

Начало карьеры Бонапарта было положено взятием Тулона 18 декабря 1793 г. После разгрома роялистского восстания в Париже 13 вандемьера (4–5 октября 1795 г.) он был произведен в дивизионные генералы.

В конце 1795 г. Наполеон составляет “Записку об итальянской армии” с разработанным им планом итальянской кампании. После длительной и безуспешной борьбы за реализацию своих планов он нашел у Карно поддержку. Стратегический ум Карно оценил идеи Наполеона, основанные на революционных принципах, которые он — “организатор победы” — сам разрабатывал. В 1796 г., 2 марта, Бонапарт по представлению Карно был назначен командующим итальянской армией. В конце марта начался знаменитый итальянский поход Наполеона 1796–1797 гг.

Тем временем недовольство коррумпированной Директорией нарастало, одновременно обострялись и противоречия внутри Директории между группой Барраса (триумвирами, как их прозвали) и оппозиционным меньшинством — Карно и Бартеlemi. Общее требование было: “надо гнать триумвиров”. Спасти их могла только опора на силу. 18 фруктидора V года (4 сентября 1797 г.) войска под командованием Ожеро (посланные уже вернувшимся из Италии Наполеоном, который считал пока полезным поддержать триумвиров, но сам не хотел быть скомпрометированным этим незаконным актом) провели по просьбе триумвиров чистку обоих советов. Большинство неугодных триумвирам депутатов были арестованы. По всей стране прошла волна чисток, названная в народе “фруктидоризацией”. После переворота 18 фруктидора (4 сентября) 1797 г. Л. Карно, предупрежденный друзьями, принужден был бежать в Швейцарию. Это была его первая (но не последняя) вынужденная эмиграция.

По закону, принятому на следующий день после переворота, все места, занимаемые ранее “фруктидоризированными”, были объявлены свободными. Поэтому министр внутренних дел Летурне, который быстро сориентировался, написал в Институт Франции, чтобы на место Карно выбрали Бонапарта. Так Л. Карно (правда, временно) перестал быть академиком, а Наполеон (тоже временно, но на более долгий срок — до своего падения) стал им.

Избрание Бонапарта членом Института Франции 25 декабря 1797 г. не было только данью его военным заслугам. Он в молодости серьезно занимался математикой и баллистикой. И в дальнейшем он интересовался физикой и следил за научной литературой.

На место, которое освободилось после изгнания Карно, было 11 претендентов, но Наполеон при поддержке Лапласа собрал наибольшее количество голосов. В благодарственном письме президенту Института он писал: “Голосование выдающихся ученых, составляющих Институт, оказало мне честь. Я сознаю, что прежде, чем стать им равным, мне еще долго придется быть их учеником”. Бонапарт аккуратно посещал все заседания класса и секции. Он очень гордился своим академическим званием и ставил его во всех документах впереди военного. Даже

воззвание к египетскому народу во время похода от 2 июля 1798 г. начиналось так: “Бонапарт, член Национального института, командующий армией...” Знаменитый его приказ, отданный во время египетского похода, когда войска, обороняясь от вражеской конницы, выстроились в каре: “ослов и ученых — на середину”, хотя и своеобразно, но хорошо показывает, как он ценил деятелей науки. Действительно, самое ценное в походе — это вьючные животные, и им наряду с учеными в первую очередь нужно обеспечить безопасность.

В Швейцарии Карно через некоторое время был обнаружен шпионами Директории, и французское посольство потребовало у Женевской республики его выдачи. Ему пришлось снова срочно бежать, прибегнув к маскарადу — надеть блузу, бумажный кофак и водрузить на голову корзину с бельем; затем по озеру его переправили на лодке в Нион. Два последующих года он жил в Аугсбурге под вымышленным именем и коротал досуг вдали от жены и маленького сына за научной работой и литературой.

События 18 фруктидора окончательно скомпрометировали Директорию, ее неспособность управлять страной стала ясна всем. Расстройство экономики, развал администрации, массовые насилия, недовольство всех классов — все это не могло быть устранено системой “качания между правыми и левыми”. Сыграли свою роль и поражения, которые нанес Суворов французской армии в Италии. Падение Директории было только вопросом времени.

Когда Наполеон после возвращения из египетского похода 18 брюмера (14 ноября) 1799 г. разогнал Директорию, ее никто даже не пытался поддержать. Наступил период Консульства.

Одним из первых действий первого консула — Наполеона — после прихода к власти была отмена репрессивных законов, принятых во время “фруктидоризации”. Последовало не только возвращение Л. Карно из эмиграции, но и через короткое время назначение его военным министром. Одновременно и другому известному ученому — П. Лапласу —

Бонапарт поручил возглавить министерство внутренних дел. Тем самым первый консул продемонстрировал свое уважение к науке и деловым качествам ее представителей. Однако вскоре пришлось заменить и того, и другого, но по разным причинам. Карно был слишком самостоятельным и активным, а Лаплас, напротив, — беспомощным и абсолютно неспособным к административной деятельности. Карно вскоре сам понял, что не сработается с Бонапартом, и, как всегда, коротко и ясно изложил свое решение: “Граждане консулы, я прошу Вас об увольнении от министерства; благоволите принять мою просьбу. Л. Карно”. Он был заменен более близким к Бонапарту человеком, и соответственно более надежным, — А. Бертье, будущим маршалом и бессменным начальником штаба Наполеона.

С этого времени вплоть до 1814 г. центр тяжести в деятельности Л. Карно переносится из политики в науку и семейные дела, главным из которых было воспитание детей — старшего сына Сади и младшего Ипполита, родившегося в 1801 г.

Отходу Л. Карно от политической деятельности способствовала и позиция, занятая им по отношению к Бонапарту. Вначале он надеялся, что Бонапарт, восстановив порядок во Франции, будет действовать подобно Вашингтону. Когда вскоре стало ясно, что так не будет, он начал открыто противиться укреплению диктатуры Наполеона — как во время Консульства, так и при установлении Империи. По образному выражению Араго, “Карно остался один среди развалин республики”.

Непреклонную позицию Карно хорошо показывает его выступление в Трибунале при обсуждении в 1804 г. предложения об установлении наследственной империи Наполеона Бонапарта и его семьи. 24 оратора поддержали это предложение, и только один — Л. Карно — выступил против. Он сказал: “Какие бы услуги ни оказал гражданин своей стране, существуют границы для благодарности нации, установленные честью и благоразумием. Если этот гражданин восстановил общественную свободу, если он спас отечество, может ли служить ему наградой принесение свободы в жертву?...” И далее: “Свободный режим легче установить, и он прочнее, чем олигархический или деспотический строй. В прежнее время я подал голос против пожизненного консульства¹⁾, теперь я подам его против установления монархии”. Его голос был единственным. Остальные несогласные предпочли “кулуарную” оппозицию. Один из них пустил характерную фразу, оставшуюся в истории: “Быть Бонапартом и стать королем! Так опуститься!”

К чести Наполеона, он, несмотря на крамольные высказывания Карно, ни в период Консульства, ни в период Империи не только не преследовал своего упрямого оппонента, но и сохранял с ним корректные отношения и всячески поддерживал его научную деятельность.

Для того чтобы понять дальнейшие события, связанные с развитием науки в годы Империи, в частности и с жизнью семьи Л. Карно, нужно иметь в виду одну важную особенность Наполеона, относящуюся к его, как говорят теперь, “кадровой политике”. В отличие от большинства правителей, боявшихся сильных людей в своем непосредственном окружении, а иногда и в отдаленном, Бонапарт везде стремился отдавать ключевые должности людям острого, сильного ума (*les hommes d'esprit*), как он любил говорить, или, по выражению историка А. Манфреда, “составить свою команду из игроков первой категории”. Опасений, что кто-нибудь из них может стать конкурентом или способствовать такому конкуренту, у него не возникало. Он всегда был уверен, что будет намного умнее и сильнее. Этот стиль отразился и на его отношении к научным деятелям, даже таким, которые не скрывали свою оппозицию его политике.

Характерным примером может служить восстановление членства Л. Карно в Институте Франции. Как только по смерти члена Института Леруа открылась вакансия, Карно по предложению Наполеона был

¹⁾ Тогда было подано четыре голоса против, один из них принадлежал Л. Карно.

вновь избран в академики (5 жерминаля VIII года — 1799 г.) по тому же классу физико-математических наук.

Вообще надо отметить неизменно уважительное отношение и всяческую поддержку, которую Наполеон оказывал представителям науки и научным учреждениям. В этом отношении он продолжил лучшие традиции Французской революции¹⁾, четко отраженные в постановлении Конвента, вынесенном при учреждении Национального института: “совершенствовать науки и искусства, а также следить за работами, имеющими целью общественную пользу и славу республики”.

Несмотря на существенную эволюцию своих взглядов — от радикально-революционных до реакционно-монархических, Наполеон не изменил отношения к науке и ученым; он отсекал и все попытки ограничить из-за опасности возникновения “крамолы” деятельность научных учреждений и учебных заведений. Здесь совпадали и личные пристрастия, и чисто практические соображения. Как умный политик и образованный человек он хорошо видел пользу, которую приносит наука промышленности, сельскому хозяйству и финансам, а следовательно, и военной мощи страны. Характерен его ответ на предложение закрыть Политехническую школу: “Нельзя резать курицу, которая несет золотые яйца”. Вместе с тем он понимал, в отличие от многих других политических деятелей, что настоящие люди науки никогда не примут участия ни в каких политических интригах или заговорах, и их не нужно опасаться.

Разумеется, было бы неверно идеализировать Наполеона в том смысле, что он всегда принимал наилучшие решения по научно-техническим вопросам (в том числе и касающимся вооружений). Достаточно вспомнить о том, что он закрыл Медонскую школу, в которой велись опыты по воздухоплаванию, и упразднил организованные еще Конвентом при участии Карно воздухоплавательные роты, хорошо зарекомендовавшие себя в войнах революции.

Такую же недальновидность он проявил в ходе переговоров с Р. Фультоном о подводной лодке (1800 г.) и пароходе (1803 г.). Известно, что Л. Карно наряду с другими членами Института Франции участвовал в успешном испытании парохода на Сене 9 августа 1803 г. Однако в литературе не удалось найти какие-либо достоверные материалы о содержании представленного ими доклада. История отношений Фультона с Наполеоном довольно сложна: в ней с чисто техническими и финансовыми вопросами переплетены политические и даже личные. Однако остается фактом, что Бонапарт недооценил работы Фультона и связанные с ними возможности; правда, он опирался при этом на отрицательный отзыв академических экспертов.

¹⁾ Во время революции были, разумеется, и другие примеры: известна печально знаменитая фраза жестокого и ограниченного председателя Трибунала, пославшего А. Лавуазье на гильотину: “Революция не нуждается в химиках”. Но это были крайности террора, не характерные для общей линии, направленной на форсированное развитие науки.

В целом же обстановка для развития естественных и точных наук при Наполеоне была весьма благоприятной; она не шла ни в какое сравнение с временами реставрации Бурбонов, сопровождавшимися всяческими гонениями на науку и школы всех уровней. Условия, в которых пришлось работать С. Карно, в этом отношении, как мы увидим, были намного хуже, чем у его отца.

Л. Карно в это относительно спокойное время принимал активное участие в работе Института Франции, он написал и опубликовал ряд новых исследований.

Как член Института Карно входил в ряд комиссий, создаваемых для оценки различных изобретений и теоретических работ. Кроме этого, он лично получал на отзывы многочисленные работы по механике и добросовестно их рецензировал. Современники, в частности Араго, отмечали его доброжелательность; иногда он помогал авторам понять то, что они сами сделали. Вместе с тем он умел сомневаться и никогда не считал свои выводы непогрешимыми.

Среди работ такого рода, выполненных Л. Карно (или с его участием), для нас представляет особый интерес экспертиза изобретения братьев Ньепсов — Клода и Жозефа — пирэолофора¹⁾. Существование этого изобретения — первого двигателя внутреннего сгорания — имеет непосредственное отношение к будущей работе С. Карно: этот двигатель упоминается в его “Размышлениях о движущей силе огня...”.

В 1806 г. братья Ньепсы представили на отзыв в Институт записку о своем изобретении. Она была доложена Л. Карно 17 ноября 1806 г. на заседании физико-математического класса. От имени двух комиссаров, назначенных для экспертизы, — своего и К. Бертоллы — он дал высокую оценку изобретению Ньепсов²⁾. Сообщение о докладе Карно было помещено 10 января 1807 г. в правительственном органе “Монитёр”.



Рис. 4. Отец С. Карно — Лазар Карно, член Института Франции.

¹⁾ Pyreolophore. Название составлено из трех греческих слов: “pyre” — огонь, “olo” — ветер и “phore” — несущий, произвожу.

²⁾ Братья Ньепсы более известны в истории техники как изобретатели первого фотографического процесса. Дальнейшая история пирэолофора излагается по работе: *Раскин Н.М.* Забытая страница в истории двигателя внутреннего сгорания // История естествознания и техники. 1988. № 6. С. 76–84.

Кончалась эта заметка так: "...мощные толчки машины, сотрясения, сообщаемые ею телам, на которых она покоится, и, наконец, быстрота движений не позволяют сомневаться в силе и мощности этого нового движущего начала; можно ждать от него самых счастливых результатов, когда путем повторных опытов удастся сообщить ему всю мощност, на которую оно способно. Таково мнение комиссаров; и класс постановил, чтобы их доклад целиком был помещен в историческую часть его "Мемуаров", чтобы увековечить дату того первого опыта, который может стать крайне интересным по своим физическим и историческим результатам".

Идея Ньепсов и путь их рассуждений очень ясно изложены ими самими: "Занимаясь разысканием физической силы, которая могла бы сравниться с силой паровых машин и при этом не требовала бы таких громоздких устройств, а в особенности не поглощала столько топлива, мы предположили, что нашим требованиям мог бы удовлетворить расширяемый огнем атмосферный воздух... Если [эта субстанция] будет внезапно пронизана в замкнутом сосуде пламенем чрезвычайно горючего вещества, измельченного в очень мелкий порошок и рассеянного по всему объему этого сосуда, то она разовьет гораздо большую энергию и произведет нечто вроде взрыва, соразмерного сопротивлению тех препятствий, которые он должен преодолеть".

Здесь не только совершенно четко изложена сама идея двигателя внутреннего сгорания, но и достаточно правильно описаны особенности процесса и преимущества (компактность и меньший удельный расход топлива) перед паровой машиной. Правда, положение об уменьшенном расходе топлива Ньепсы дали в общей форме, без научного анализа. Сделать такой анализ смог через 20 лет только С. Карно; работа братьев Ньепсов несомненно сыграла свою роль в подготовке этого анализа.

Одной из основных (если не самой главной) трудностей был для того двигателя выбор топлива. Предшественник Ньепсов — англичанин Стрит (1794 г.) предложил двигатель, на дно цилиндра которого подавалась летучая жидкость (терпентин¹) или спирт); француз Лебон (1799 г.) предлагал газовое топливо (это было связано с тем, что он сам был изобретателем светильного газа). При этом предусматривалось сжимать газ и воздух отдельно и смешивать их в специальной камере. Воспламенение смеси в цилиндре двигателя должно было производиться от электростатической машины (пробораз современной системы зажигания).

Вариант Ньепсов с твердым порошкообразным топливом был намного сложнее, чем с жидким или газовым. Братья Ньепсы испытали ликоподий — легко воспламеняющийся порошок, используемый в то время для создания вспышек при театральных представлениях, затем смесь каменноугольного порошка и смолы. В письме (декабрь 1807 г.) к

¹) Терпены — группа ненасыщенных углеводородов (общая формула $C_{10}H_{16}$).

Л. Карно, который продолжал поддерживать изобретателей, они сообщали: "...сейчас мы уже изготовили легко воспламеняющийся порошок, состоящий из одной части смолы с девятью частями каменного угля..." В конце концов они все же пришли к мысли о жидком горючем — нефти. Ньепсы достаточно четко представляли себе и механический цикл двигателя, включающий четыре последовательных такта, близких к будущему циклу Отто (1878 г.). Не будучи профессиональными механиками и не располагая достаточными средствами, братья Ньепсы не могли довести свою машину до действующего образца. Но дело было не только в этом. Нельзя забывать, что даже при самых благоприятных условиях путь "от идеи до машины" очень труден и требует значительных затрат сил и времени. Это относится в полной мере и к нашему просвещенному веку, а тем более к началу XIX века, когда ни технология машиностроения, ни качество конструкционных материалов не достигли уровня, позволяющего построить надежный двигатель внутреннего сгорания.

Ньепсы понимали это на основе своего практического опыта достаточно ясно. Они писали: "Эта машина, несомненно, еще очень несовершенна, но мы, может быть, приобрели право на снисхождение, если принять во внимание цели, которыми мы руководствовались в нашей работе... Мы убеждены, что только долгое исследование может дать производству человеческого ума ту степень совершенства, которая возможна".

Тем не менее, смотря далеко вперед, Ньепсы думали о буксирных судах с двигателями внутреннего сгорания¹⁾ и даже (пользуясь современной терминологией) автомобилях. "Можно было бы применять его для передвижений экипажей с силой и скоростью, превосходящими силу и скорость животных, и тогда понятно, какое получится преимущество, главным образом со стороны экономии".

Братьям Ньепсам не было суждено довести свои идеи до реализации в действующих устройствах: для этого понадобилось еще больше половины столетия. Но их заслуги в области создания тепловых двигателей не ограничиваются тем, что они создали задел для дальнейшей работы Отто, Дизеля и других изобретателей. Не меньше их заслуга и в том, что они, при поддержке Л. Карно, собрали важный материал для основополагающих теоретических обобщений, сделанных впоследствии С. Карно в его знаменитом мемуаре. Но об этом подробно будет сказано дальше.

Наряду с работами в Институте Франции Л. Карно выполнял отдельные поручения Наполеона. Так, в 1809 г. он за 4 месяца написал знаменитый в свое время "Трактат о защите крепостей" — по всеобщему признанию, новое слово в области фортификации, продолжив традиции по-прежнему почитаемого им маршала Вобана.

¹⁾ Интересно, что в качестве движителя предусматривалось водометное устройство.

Научные работы, опубликованные им в это время, связаны, как и прежде, с механикой и математикой. Это прежде всего книга по механике, развивающая и дополняющая идеи, выдвинутые в уже упоминавшейся работе “Опыт о машинах вообще” (1783 г.). Она называлась “Основные принципы равновесия и движения” и вышла в Париже в 1803 г.; затем она была переведена на немецкий язык и выпущена через два года в Лейпциге. В ней окончательно был сформулирован тезис об “идеальной машине”: “идеальная машина ничего не должна терять из силы, которая приводит машину в действие”. Это та основополагающая мысль, которая была распространена С. Карно на тепловые машины.

Список трудов Л. Карно по математике открывает его работа “Размышления о метафизике исчисления бесконечно малых” (1797 г.). Интересно привести отзыв об этой работе Карно известного советского историка математики А. П. Юшкевича: “Подводя итоги лейбницевской математики и резюмируя XVIII век, Карно своим пониманием близости понятий предела и бесконечно малого стоит на грани новой эры в истории математики”.

Затем последовал ряд публикаций по геометрии: “О соотношении геометрических фигур” (1801 г.), “Геометрия положения” (1803 г.), где Л. Карно выдвинул некоторые идеи топологии, “Теорема о произведении простых отношений” (1803 г.), в которой была доказана еще одна теорема, названная впоследствии его именем, и “Этюд о трансверсалиях” (1806 г.), в котором он дал ряд идей проективной геометрии.

Жизнь семьи Карно в это время, вплоть до 1814 г., протекала без каких-либо бурных событий. Карно тщательно исполнял обязанности члена Института Франции, уделял много внимания семье, особенно после смерти жены воспитанию двух сыновей. Материальное положение семьи было скромным, так как ее глава не занимал никаких престижных и высокооплачиваемых должностей. Небольшой доход его формировался из части наследства, оставшегося от родителей, и пансиона в 10 тыс. франков, который ему установил Наполеон в 1806 г. Тем не менее Карно должен был экономить; он не мог даже выписывать нужные ему научные журналы и ходил читать их в библиотеку Института.

Не принимая, как в прежние времена, активного участия в политической жизни, он внимательно следил за ее ходом и представлял бесперспективность и опасность завоевательных авантюр Наполеона. Но он также отчетливо понимал, что повлиять на ход событий не может, попыток вмешаться не предпринимал и полностью сосредоточился на семье и научной работе.

Современники описывают его внешность и манеру поведения в это время так: “Карно — высок ростом, имеет правильные черты лица, обращение учтивое, но холодное; даже в старости сохранил военную выправку”. Вместе с тем в кругу друзей и родных он был менее замкнутым, очень внимательным, добрым и веселым человеком, с хорошо развитым чувством юмора.

Политические события в Европе тем временем развивались все более неблагоприятно для наполеоновской империи. Неудачи в Испании, разгром 1812 г. в России... Последовавший за ним антинаполеоновский заговор Мале в Париже показал рост оппозиции Наполеону даже в правящих кругах. Несмотря на победы в отдельных сражениях летней кампании 1813 г (Бауцен, Дрезден), дело неуклонно шло к концу. В “битве народов” под Лейпцигом 16–18 октября 1813 г. французская армия потерпела решающее поражение; в 1814 г. боевые действия начались на территории Франции. Наполеон дрался с войсками коалиции как в свои лучшие времена, но соотношение сил было уже не в его пользу. В тылу предатели во главе с Талейраном готовили его низвержение. Карно, несмотря на неприятие политики Наполеона, не мог быть на стороне заговорщиков, подготавливающих вступление союзников в Париж. Более того, он считал своим долгом оказать поддержку Наполеону.

24 января 1814 г., когда военные дела стали совсем плохи, он написал Наполеону письмо, содержание которого говорит само за себя.

“Государь! Пока успехи венчали Ваши предприятия, я не позволял себе предложить Вашему величеству свои услуги, которые могли быть неприятны Вам; ныне, когда злая фортуна испытывает Вашу твердость, я решился предоставить себя Вашей воле. Конечно, не велики средства шестидесятилетнего старика; но я думаю, что пример солдата, патриотические чувства которого всем известны, может собрать около Ваших орлов много людей, колеблющихся в своих намерениях и даже уверенных в том, что, удаляясь от них, служат своему Отечеству.

Еще есть время, государь, завоевать славный мир; еще Вы можете возвратить себе любовь великого народа”¹⁾.

Карно дает понять Наполеону, что выход есть только один — союз с республиканцами и опора на народ, откуда он может почерпнуть новые силы.

Наполеон, естественно, не мог принять эти радикальные рекомендации. Однако от услуг Карно не отказался: ему было поручено обеспечить защиту Антверпена от англичан. Старый опытный воин, которому Наполеон перед этим присвоил звание дивизионного генерала, выполнил эту задачу с блеском и, несмотря на все трудности, отстоял город и сложил оружие только после получения приказа из Парижа.

Последующие события хорошо известны: капитуляция маршала Мармона, занятие войсками союзников во главе с Александром I Парижа, отречение Наполеона и переход Людовика XVIII из обоза союзников на трон Франции. Король и его окружение, в особенности младший брат — граф Д’Артуа, которые за время эмиграции “ничего не забыли и ничему не научились”, были настроены очень воинственно и горели желанием отомстить всем активным участникам революции. Естественно, что одним из первых при таком ходе событий должен был бы пострадать Л. Карно.

¹⁾ Carnot L. Correspondance generale de Carnot. Paris, 1892. Т. 3. Р. 161.

Однако всем, кто понимал в какой-то степени внутреннее положение Франции, было ясно, что уничтожить все изменения, происшедшие со времени революции, невозможно; допустить открытый террор реакции тоже нельзя. Это хорошо видел и Александр I, на которого король еще при первой их встрече произвел весьма неблагоприятное впечатление. Он дал понять Людовику XVIII, что если тот хочет остаться на троне, надо признать большую часть свершившихся фактов и установить форму правления, которая была бы не абсолютистской, а в какой-то степени либеральной.

В результате установился режим первой реставрации, близкий к буржуазной монархии. Однако роялисты своих намерений не оставили. Все, что можно было сделать, чтобы восстановить против себя народ (и крестьян и буржуа), а также армию, они сделали; оппозиция Бурбонам стремительно росла. В ней были разные течения: были сторонники возвращения Наполеона; были и такие, кто намечал республиканский вариант с передачей власти Л. Карно. Однако дальше общих замыслов все эти планы зимы 1815 г. не пошли.

Тем временем сосланный на остров Эльбу Наполеон внимательно следил за развитием событий. В конце февраля 1815 г. он решил, что час настал.

1 марта 1815 г. Наполеон с “армией” около тысячи человек высадился на южном побережье Франции. Без единого выстрела он прошел путь до Парижа. В ночь с 19 на 20 марта Людовик XVIII бежал, и 20 марта Наполеон вернулся в Париж. История возвращения Наполеона и “100 дней” его управления подробно описаны в литературе. Л. Карно сыграл в ней одну из решающих ролей; он снова, уже в последний раз, вернулся к активному участию в политической борьбе. Ее результат определил во многом дальнейшую судьбу не только самого Л. Карно, но и его семьи.

Свержение Бурбонов породило большие надежды народа; все прежние беды были забыты. Крики “Да здравствует император! Долой дворян и попов!” свидетельствовали о том, чего ждали от Наполеона — возвращения к прежним республиканским временам и устранения опасности новой интервенции. Карно тоже разделял эти надежды. Они казались реальными: Наполеон пригласил его занять пост министра внутренних дел; это было воспринято как акт примирения с республиканцами.

Наполеон спешно при помощи Даву и Карно формировал новую армию. Но в подходе к решению этой задачи взгляды Карно и Наполеона существенно различались. Карно предлагал меры из арсенала и опыта революции: вооружать ремесленников и беднейшие слои общества, создать из них многочисленную национальную гвардию. Император Наполеон не мог решиться на такие меры — это был уже не тот молодой генерал Бонапарт, которого Карно когда-то поставил во главе итальянской армии.

После ряда успешных сражений последовало страшное поражение при Ватерлоо. Положение стало катастрофическим. 21 июля Карно предложил в палате пэров провозгласить отечество в опасности и

учредить на время диктатуру. Как писал А. З. Манфред, это “означало бы возврат к политике Комитета общественного спасения с Наполеоном в роли Робеспьера во главе”¹⁾. Этого и требовал народ. Но и времена были не те, и люди наверху были совсем другие. Ни палата, ни сам Наполеон не поддержали предложения Карно.

Войска союзников снова вступили в Париж, и Бурбоны второй раз вернулись во Францию. Началась эпоха второй реставрации, гораздо более реакционной, чем первая; наступило время беспощадного белого террора, мстительной расправы. Брат короля граф Д’Артуа, лидер крайне правого крыла роялистов, требовал высылки из страны всех, кто активно действовал в течение 100 наполеоновских дней. Но это сделать было просто невозможно: армия Бурбонов осталась бы без офицеров. Поэтому в королевском ордонансе от 24 июля 1815 г. число приговоренных к изгнанию было относительно небольшим; одним из первых был, естественно, Л. Карно. В это время он находился в своей резиденции под Парижем в Пресле; открыто выступив в печати против белого террора вообще, он отверг и обвинение в клятвопреступлении, которое ему вменялось, поскольку никогда не присягал в верности Бурбонам. Тем не менее было очевидно, что уехать из Франции необходимо. Но куда? Можно было, как сделали многие, переселиться в Америку, но Лазар хотел остаться в Европе, чтобы быть ближе к Франции и к старшему сыну Сади (младшего, Ипполита, можно было взять с собой).

Брат Л. Карно – генерал Фелен принял активное участие в поисках политического убежища для Лазара. Потерпев неудачу у англичан (Веллингтон ему ответил, что, к сожалению, не может оспаривать решение французского правительства, хотя относится к Карно с уважением), он обратился к Александру I с просьбой защитить его брата. Александр показал себя здесь более дальновидным политиком, чем Веллингтон. Он понял, что такая фигура, как Л. Карно, представляет определенную ценность для России в той политической ситуации, которая сложилась после победы союзников. Ему хорошо были известны интриги Бурбонов²⁾. Через министра иностранных дел Каподистрия Александр I ответил, что он был “неприятно удивлен” включением Карно в список проскриптов, но не может вмешиваться во внутренние дела Бурбонов. От имени царя Каподистрия официально предложил Л. Карно политическое убежище в России и службу в русской армии; за словами последовало и дело: ему был оформлен русский паспорт.

Прежде чем принять окончательное решение, в середине сентября 1815 г. Карно поехал в Брюссель, где собралась значительная группа французских эмигрантов самых разных политических направлений. По-видимому, знакомство с ними не вызвало у Карно — человека дела —

¹⁾ Манфред А.З. Наполеон Бонапарт. М.: Мысль, 1973. С. 754.

²⁾ Кроме данных разведки, у Александра в руках был секретный договор от 3 января 1815 г. Англии, Австрии и Франции, направленный против России и Пруссии. Покидая в панике Париж, Людовик XVIII оставил экземпляр во дворце; Наполеон сразу же переслал его Александру.

желания избрать Брюссель местом постоянного пребывания: он решил вернуться домой, забрать сына Ипполита и ехать в Россию.

Обстановка во Франции с каждым днем становилась все опаснее. В ноябре у Карно отобрали французский паспорт и приказали явиться в Блуа под надзор властей. Медлить было нельзя. В начале января 1816 г. Л. Карно вместе с Ипполитом и служанкой Жозефиной, проехав всю среднюю Европу, пересек русскую границу и прибыл в назначенное ему на первое время место пребывания — Варшаву.

Восторженная встреча, которую оказали Карно не только польские “франкофилы”, но и передовая часть русского общества Варшавы, возмутила и даже напугала великого князя Константина Павловича, наместника Польши, брата Александра. Константин не мог понять далеких расчетов императора, которого мало пугало “якобинское” прошлое Карно. Окружив Карно шпионами и собрав на него целую кучу “компромата”, Константин стал бомбардировать Александра донесениями и письмами с требованиями удалить Карно, поскольку он “очень опасный человек и политик”. По-видимому такой точки зрения придерживался не только Константин, но и другие люди из окружения императора; Александру пришлось отказаться от планов привлечения Карно, а также ряда других французских военных и ученых к службе в русской армии и гражданских учреждениях. Либерал Каподистрия не мог изменить ситуацию, но продолжал любезную переписку с крамольным французом.

Карно, как бывалый политик, понял и сложившуюся обстановку, и ее причины. В письме своему бывшему адъютанту подполковнику Разонне он писал: “Константин устроил против меня целый заговор”. Оставалось одно — уехать; Карно выбрал Пруссию. “Пруссаки долго гоняли меня из города в город, пока не предложили на выбор несколько провинциальных городков”, — писал он. “Я выбрал Магдебург. Здесь тихо, хотя Ипполит и хнычет по Варшаве — его избаловали там польские дамы”. Выбор Магдебурга, возможно, диктовался и тем, что он расположен на западе Пруссии, ближе всего к Франции. Кроме того, этот город имел славные научные традиции, идущие еще от его знаменитого ученого бургомистра — Отто фон Герике.

Связи с Россией, однако, еще некоторое время продолжались: последнее письмо Каподистрии Карно направил из Магдебурга 12 мая 1817 г. Здесь Л. Карно и провел вместе с Ипполитом последние пять лет своей жизни; он умер и был похоронен в Магдебурге в 1823 г. Сади удалось посетить здесь отца на короткое время только один раз — в 1821 г. Эта встреча, однако, сыграла большую роль в работе С. Карно над теорией тепловых машин. Отец и сын имели возможность обсудить основные положения будущей книги С. Карно.

Детство и юность Сади Карно Политехническая и инженерная школы

Лазар Карно, хорошо знавший литературу, в особенности поэзию, очень любил персидского поэта-гуманиста Саади. Он назвал этим именем сначала своего первого сына Никола Леонарда, который скончался, не прожив и месяца, а затем второго — Сади Карно, который родился 1 июня 1796 г. в Люксембургском дворце. Семья Карно занимала в нем служебную квартиру, на которую ее глава имел право, как один из членов правящей Директории.

Во время бегства отца после переворота 18 фруктидора V года, когда реакционные вожди Директории собирались его уничтожить, Сади с 4 сентября 1797 г. находился вместе с матерью в доме ее семьи в городе Сент-Омер. О детских годах Сади сохранились очень скудные сведения. Известны лишь два эпизода, описанные его младшим братом Ипполитом.

Первый относится к периоду Консульства, когда Л. Карно после возвращения из эмиграции работал вместе с первым консулом — Бонапартом. Кроме служебных их связывали и личные отношения, завязавшиеся еще во времена Директории. Когда Л. Карно отправлялся в Мальмезон для работы с Бонапартом, он брал с собой и Сади, которому в то время было 4 года. Мальчик оставался обычно с Жозефиной, женой Наполеона. Она любила мальчика, и они были очень дружны. Однажды она и несколько других дам катались в лодке по пруду. Наполеон, стоявший на берегу, сначала наблюдал за ними, а потом стал развлекаться тем, что бросал камешки, которые падали в воду, поднимая брызги, попадавшие на сидевших в лодке. Никто не осмелился сделать Наполеону замечание, и он очень веселился, глядя на женщин, старающихся спрятаться от летящих на них капель. Мальчик, наблюдавший некоторое время эту сцену, вдруг смело встал перед Наполеоном и, угрожая ему кулаком, крикнул: “Скотина первый консул, изволь оставить этих дам!” Наполеон удивленно посмотрел на него, улыбнулся... и бросил свою забаву. Своим рыцарским поступком маленький Сади завоевал симпатии всех свидетелей этой сцены. Пожалуй это был единственный случай в жизни Наполеона Бонапарта, когда его действия открыто подверглись такой нелюбезной и смелой критике (если не считать выступлений Л. Карно, о которых упоминалось в предыдущем разделе).

Второй эпизод, который произошел там же, свидетельствует не столько о характере юного Сади, сколько о формировании круга его интересов. Однажды, когда отец, закончив свои дела, собирался возвращаться домой из Мальмезона и пришел к мадам Бонапарт за сыном, тот куда-то исчез. Его нашли очень далеко, на мельнице; Сади смотрел на ее механизм, а мельник объяснял, как он работает. В последующие дни мальчик упорно ходил к мельнику, пока не понял все, что хотел узнать.

Эти случаи характеризуют две черты Сади, пронесенные им, как свидетельствуют современники, через всю жизнь — нетерпимость к

любой несправедливости и любознательность, в особенности интерес к технике.

Нужно отметить, что домашнее воспитание, которое получил Сади, было весьма разносторонним. Отец, как уже упоминалось, знал и любил литературу (даже сам писал неплохие стихи ¹⁾); мать была хорошей пианисткой и привила сыну любовь к музыке (Сади всю жизнь не расставался с виолончелью). Тем не менее рано проявившийся, но устойчивый интерес к технике определил решение Л. Карно готовить сына к поступлению в Политехническую школу — решение, которое Сади и сам разделял. Подготовка к экзаменам в основном велась дома с отцом; несколько месяцев для ее завершения Сади посещал курсы преподавателя Бурдона в Шарлеманьском лицее (лицей Карла Великого).

1 июня 1812 г. Сади исполнилось 16 лет, и он мог уже держать вступительные экзамены в Политехническую школу. Он был принят решением жюри от 28 сентября 1812 г. двадцать четвертым из 179 принятых. 12 октября он был представлен администрации школы своим отцом, а 2 ноября 1812 г. начались занятия. Режим в школе был довольно жестким: подъем в 5 утра, отбой в 9 вечера. Теоретические и практические занятия велись ежедневно, в том числе и в воскресенье, с 8 до 2 дня и с 5 до 8 вечера. Остальное время отводилось на туалет, уборку жилья, прием пищи и военные занятия. Допускались кратковременные выходы за пределы школы.

Научно-методические вопросы обучения в школе решал специальный совет, который тщательно наблюдал как за программой обучения, так и за методикой преподавания. Он состоял из председателя, четырех представителей профессуры, заместителя директора по учебному процессу, четырех экзаменаторов и казначая школы. Кроме того, в совет входили и внешние члены — три представителя Института Франции (одним из них с 1813 по 1814 г. был Л. Карно) и восемь представителей прикладных школ. Последние отстаивали интересы “потребителей” — специальных школ, в которые направлялась основная часть выпускников. Таким образом, в этом совете были представлены, наряду с собственными преподавателями, высшее научное учреждение страны — Институт Франции и специализированные школы, в которых выпускники должны были продолжить образование. История Политехнической школы говорит о постоянных острых дискуссиях между представителями теоретических и прикладных дисциплин при распределении учебных часов, при обсуждении формы практических занятий и т. д. Однако, как правило, они велись только в интересах дела; люди, которые в них участвовали, были специалистами наивысшей для того

¹⁾ Известны его стихи “Заслуга женщин”, в которых есть две строки, ставшие распространенным афоризмом: “Достоинства женщины — это ее собственные свойства, недостатками она обязана мужчинам”. В 1821 г. в Париже вышла его героико-комическая поэма в шести песнях “Дон Кихот”.

времени квалификации. В результате поддерживалось некоторое оптимальное соотношение между различными учебными дисциплинами.

Все это позволяло обеспечить более высокий уровень обучения по сравнению с другими инженерными школами. В течение первой половины XIX века Политехническая школа служила образцом для многих вновь создаваемых в различных странах (в том числе и в России) высших технических учебных заведений.

Из преподавателей, у которых учился Сади, наиболее известны Пуассон и Араго; он был также знаком с Дюлонгом и Пти. В то же время такие знаменитости, как Ампер, Прони и Гей-Люссак, преподавали в другом отделении школы, и Сади их учеником непосредственно не был. Период, когда в Политехнической школе работали Лагранж, Фурье, Лаплас и Бертолле, ушел в прошлое, но и их традиции сохранялись.

Важно отметить и то, что, несмотря на милитаризацию, характерную для наполеоновского режима, она в малой степени затронула Политехническую школу; военные дисциплины никогда не занимали в ней первенствующего положения. Считалось, что эта часть подготовки — дело специальных школ.

На первом курсе время между основными теоретическими дисциплинами распределялось так: 27% — математический анализ, 18% — механика (ее преподавал Пуассон), 23% — геометрия, 12% — химия, 7% — физика (без механики). Кроме того, преподавали топографическое и художественное рисование, а также французский язык (грамматика и сочинение).

На втором курсе учебные дисциплины были примерно теми же, что и на первом, плюс архитектура, военное искусство, геодезия и теория машин. Текущий контроль за работой учащихся и экзамены в конце каждого курса были довольно жесткими.

Сади учился хорошо; выпускные экзамены он сдал десятым, несколько продвинувшись вперед по сравнению с положением, которое занимал при поступлении (24-е место). Вместе с тем в документах



Рис. 5. Семнадцатилетний Сади Карно в форме Политехнической школы (портрет работы Буайе)

школы отсутствуют какие-либо материалы, отражающие проявление у него каких-либо особых способностей, предвещавших его будущее; он был просто хорошим учеником, не более. Обвинять преподавателей в том, что они не заметили в способном ученике 17–19 лет будущего классика науки, нет оснований. Из истории науки известна некая общая закономерность: чем более абстрактна область научного творчества, тем, как правило, в более раннем возрасте созревают в ней таланты; в прикладных же науках, в частности в технических, созревание наступает позже.

С. Карно занимает в этом отношении особое положение. Он, несомненно, физик высочайшего класса, создавший фундаментальные обобщения, находящиеся на самом высоком уровне абстракции. Поэтому совершенно справедливо в литературе, относящейся к физике, он однозначно считается классиком физической науки. Вместе с тем он и инженер, причем не только потому, что основы своих теоретических концепций вывел из инженерной практики, но и потому, что создал теоретические концепции, положившие основу ряду направлений энергетической техники. Поэтому не менее справедливо, что в научно-технической литературе он тоже “свой”, и рассматривается как гениальный инженер.

И “физическая” и “инженерная” трактовка места С. Карно в истории науки в равной степени обоснованы. Возраст, в котором он развил активную научную деятельность (26–27 лет), выше среднего для физиков, но ниже среднего для инженеров.

Определенную роль в оценке успехов юного С. Карно сыграло и то обстоятельство, что он был сыном знаменитого Лазара, “большого Карно”, которого хорошо знали все преподаватели Политехнической школы. Пуассон и Араго, у которых Сади учился, заседали вместе с его отцом в Институте Франции. Это не только обязывало сына учиться на соответствующем уровне, но и успехи его рассматривались как нечто совершенно естественное.

Обучение в Политехнической школе на втором году пребывания в ней Сади в марте-апреле 1814 г. было нарушено из-за военных и политических событий: вступления союзников в Париж и последовавшей смены власти в стране. Занятия были прерваны и возобновились лишь 18 апреля.

Патриотически настроенные студенты не могли оставаться безучастными свидетелями обороны Франции от войск интервентов. Брожение среди них и стремление лично принять участие в боевых действиях возникли еще осенью 1813 г., задолго до того, как войска союзников подошли к Парижу. В бумагах Сади Карно, оставшихся после его смерти, находилась копия обращения учащихся Политехнической школы к Наполеону. Оно датировано 29 сентября 1813 г.

“Сир, отчизне нужны все ее защитники; ученики Политехнической школы, верные своему девизу, просят направить их на границу, чтобы разделить славу с храбрыми воинами, преданными делу спасения

Франции. Наш батальон, готовый с гордостью способствовать поражению врагов, вернется сюда развивать науку и готовиться к новой службе”.

Ученики Политехнической школы на этот раз не были отправлены на фронт. Но в марте 1814 г., когда союзники уже подошли к Парижу, они приняли добровольное участие в обороне города 29–30 марта в качестве артиллеристов, в их числе был С. Карно. Боевые действия прекратились лишь после того, как маршал Мармон, далеко не используя всех возможностей обороны, в тылу еще сражавшихся войск Наполеона сдал Париж союзникам. Ученики Политехнической школы покинули позиции и возвратились в школу, одни сразу же, другие в течение нескольких последующих дней.

Сади вернулся не сразу. 12 апреля 1814 г. Лазар Карно из Анвера, обороной которого он руководил, пишет сыну письмо: “Мой дорогой Сади, я с огромным удовольствием узнал о том, как отличился батальон Политехнической школы, и что ты с честью исполнил свой воинский долг. Когда я уйду в отставку, очень хотел бы, чтобы военный министр дал тебе разрешение приехать ко мне. Ты узнаешь, какая это красивая страна и красивый город...” Сади получил такое разрешение и соответствующий пропуск¹⁾. Он провел некоторое время с отцом в Анвере (до 3 мая), после чего 12 мая вернулся в Париж и возобновил занятия в школе. В сентябре он сдал выпускные экзамены и закончил Политехническую школу, получив 1 октября 1814 г. диплом и звание младшего лейтенанта инженерных войск. Дальнейший путь был намечен заранее: Сади записался шестым в список выпускников, желавших продолжить образование в специальной школе Метца.

С конца 1814 г. начинается новый этап жизни С. Карно — учеба в инженерной артиллерийской школе г. Метца.

Артиллерийская школа в Метце была одним из самых престижных военных учебных заведений страны. В нее принимали лучших выпускников Политехнической школы по соответствующей рекомендации. Школа в Метце была образована 4 октября 1802 г. в результате слияния инженерной школы, существовавшей в Метце с 1794 г., и артиллерийской школы, учрежденной в начале революции в Шалоне на Марне. Принятые в нее выпускники Политехнической школы, имеющие дипломы и звания младших лейтенантов, завершали здесь свое техническое образование и изучали военное дело, с тем чтобы стать артиллерийскими инженерами. В школе преподавали офицеры-инструкторы и профессора. Изучались физика и математика, химия, рисование и военная топография, архитектура и военное конструирование, военное искусство и фортификационные сооружения, обучали верховой езде.

С. Карно поступил сюда в последних числах декабря 1814 г. после двух месяцев отдыха, проведенных в семье с отцом. В школе Метца

¹⁾ В этом документе наряду с другими данными был указан и рост Сади — 168 см.

Сади учился до конца марта 1817 г.: его диплом лейтенанта инженерных войск датирован 2 апреля 1817 г. Каких-либо достоверных материалов о личной жизни С. Карно в течение этого времени не сохранилось. Расставшись в конце 1814 г. с отцом, он увидел его снова уже после окончания школы, в 1821 г., когда посетил его в Магдебурге. Несомненно, что ему, сыну известного политического деятеля-республиканца, находящегося в эмиграции, пришлось почувствовать результаты мер правительства Бурбонов, изгонявших из армии всеми силами не только революционный, но и наполеоновский дух. Тем не менее обучение в школе Метца, не потерявшей своих традиций и в этих условиях, дало С. Карно очень много. Он существенно обогатил свои знания и опыт в области не только военных дисциплин, но и общинженерных — от теории машин (в частности, гидравлических) до строительства заводов.

В архивах политехнической школы сохранился список учебных работ, выполненных С. Карно в школе Метца, — общим объемом 85 страниц: 1. Реферат о задачах начертательной геометрии. 2. Реферат о машинах для производства стеклянных трубок. 3. Реферат по проектам временных фортификационных сооружений. 4. Проект постоянного фортификационного сооружения. 5. Проект временного фортификационного сооружения. 6. Строительство завода. 7. Проект военного сооружения. 8. Работа по тригонометрии. 9. Проект гидравлической конструкции для большого подъемного моста. 10. Строительство военного завода.

Архив содержит также записки С. Карно на 188 страницах по ряду курсов: военному искусству, фортификации, баллистике, приложениям химии к военному искусству, тактике в наступлении и обороне, конструированию машин, геодезии (к сожалению, этот материал пока никем не изучен).

Имеется предположение (не доказанное), что, находясь в Метце, Карно имел возможность познакомиться с военным инженером, служившим в гарнизоне этого города, который в дальнейшем стал известен благодаря своим трудам по начертательной геометрии и в области теории машин, Ж. Понселе.

Учение С. Карно в Метце заняло срок на полгода дольше предусмотренного (24 учебных месяца). Дело было в том, что правительство не имело достаточно денег, чтобы оплатить новым офицерам службу в войсках, поэтому их продержали в школе 30 месяцев и выпустили только 2 апреля 1817 г. Группа из 9 выпускников Политехнической школы (в которую входил и Карно), поступивших в школу Метца в октябре 1814 г., имела к моменту выпуска уже некоторый официальный стаж военной службы: им было зачтено участие в обороне Парижа в 1814 г. и пребывание в Метце во время его осады в 1815 г.

Окончив школу и получив звание лейтенанта инженерных войск, Сади Карно, согласно традиции, получил трехмесячный отпуск, который был продлен до середины октября 1817 г. Это время он в основном провел в Нолэ, гостя у своего дяди — генерал-лейтенанта инженерных войск в отставке Фелена (того самого, который в 1815 г. обращался к Александру I, прося защиты для своего брата Лазара Карно). По

окончании отпуска Сади получает назначение в Безансон и затем, в конце 1817 г., в Сален. С этого времени для него, как в свое время для отца, начинается служба военного инженера. Она проходила по форме и по содержанию совсем не так, как в предреволюционное время, когда военная служба для офицера из третьего сословия была своего рода подготовкой к будущим сражениям. Воевать теперь было не с кем и незачем; служба оставалась только формой. Молодой человек с такими задатками и воспитанными семьей традициями, как Сади Карно, не мог этим ограничиться. Он избрал путь инженера, но не службиста, а исследователя. Он понимал, что, несмотря на высокий уровень преподавания в обеих школах, которые он прошел, его знаний недостаточно, чтобы создать существенно новое в науке. Нужно было учиться дальше и искать свой путь.

Глава 2

Жизнь военного инженера (1817–1823)

На службе и вне ее

Первые месяцы офицерской службы после назначения в полк лейтенант Сади Карно проводит без солдат и какого-либо определенного дела. Его роль сводилась к тому, чтобы иногда визировать бумаги и руководить младшими офицерами в таких ответственных работах, как, например, окраска стен в казарме. Сади скоро понял, что военная инженерная служба в его время совсем не та, какая была в прежние времена: он хорошо помнил рассказы отца и дяди.

Нужно было искать выход. Бросить военно-инженерную службу, к которой он готовился столько лет, было невозможно; нужно было искать такой ее вариант, который хоть в какой-то степени был связан с осмысленной работой и, кроме этого, давал возможность выделить время для занятий, связанных с собственными интересами. Случай представился очень скоро. Военный министр маршал Гувийон Сен-Сир, организующий заново генеральный штаб, решил создать при нем инженерный корпус, в задачи которого входило изучение состояния территории страны, дорог, мостов и создание соответствующих карт и других документов. Был издан приказ от 6 мая 1818 г. о создании королевского корпуса Генерального штаба и школы для его формирования.

Сади решил воспользоваться этим приказом: 14 сентября 1818 г. он подает рапорт с просьбой о разрешении сдать экзамен для поступления в инженерный корпус Генерального штаба и немедленно получает отпуск на четыре месяца. Он проводит его в Париже у другого своего дяди — Жозефа Карно. Экзамен, который принимал академик Пуассон, Сади легко сдал и приказом от 19 января 1819 г. был назначен лейтенантом Генерального штаба.

Но и здесь сказывалась общая ситуация в бурбоновской армии времен Реставрации: многим офицерам просто нечего было делать. Сади стал так называемым освобожденным лейтенантом. Такой “освобожденный” на определенное время офицер получал 2/3 должностного оклада без добавок на одежду и жилье и мог заниматься (или не заниматься) любым делом в течение всего предоставленного ему срока. Такой режим, правда, приводил к потере стажа и соответствующей задержке с производством в следующий чин (в данном случае — капитана). Но Сади пренебрег этим. Он поселился в Париже вблизи квартиры дяди Жозефа, все свободное время уделял самообразованию, или, по

выражению его брата Ипполита, “начал вести студенческую жизнь”. Эта характеристика, по-видимому, достаточно верно отражает стиль жизни Сади в это время. Интенсивные занятия наукой не превратили его в слишком хмурого, излишне серьезного человека. Об этом свидетельствует изречение, которое он записал в дневнике: “время, которое проводят смеясь, лучше всего использовано”.

Жажда познания С. Карно не была просто желанием расширить свой кругозор и вообще больше узнать и увидеть. Если оставить в стороне интерес к музыке (включая теорию и акустику) и изобразительному искусству, который он пронес через всю жизнь, и любовь к спорту (в частности, к верховой езде), то можно увидеть, что интересы Сади имели совершенно определенную направленность.

Свободный от каких-либо обязательств ¹⁾, он мог выбрать для изучения любой раздел науки; для этого нужно было посещать соответствующие научные учреждения, учебные заведения, библиотеки. По ним можно судить о том, какова была та конечная цель, к которой он стремился.

По воспоминаниям Ипполита, Сади часто посещал Консерваторию искусств и ремесел, Сорбонну и Горную школу. В первой из них он имел возможность слушать три бесплатных курса: прикладной химии, которую читал Клемент-Дезорм, прикладной механики (Дюпен) и экономики промышленности (Сэй). Первый из этих курсов был слишком популярен для Сади, но два других представляли для него существенный интерес; он серьезно изучил их и соответствующую литературу, в частности статьи Дезорма о теории огневых машин и экспериментальном определении абсолютного нуля и теплоемкости газов.

Математическая подготовка, которую он получил в Политехнической школе, была вполне достаточной для работы, которую он вел и намечал в будущем. Этим, по-видимому, объясняется, что математические дисциплины сами по себе его не интересовали; напротив, все, что было связано с физикой, в особенности с учением о тепловых явлениях и свойствах паров и жидкостей, привлекало его внимание. Другим направлением, которым Сади начал интересоваться в это время, была политическая экономия, и в частности экономика промышленности, лекция по которой он с интересом посещал.

Для самостоятельной работы он пользовался Королевской библиотекой, в которой проводил много времени. Сади прочел (по выражению брата, “перепотрошил”) большое количество французских и английских научных публикаций, относящихся к получению движения посредством тепла. Характерно, что он не делает никаких попыток заняться конструктивным совершенствованием паровых машин или изобрести и запатентовать какое-либо относящееся к ним техническое устройство.

¹⁾ Если не считать обязательством для любого офицера в чине до капитана, независимо от должности, выполнять каждый год одну топографическую работу на заданной местности (подготовить карту в масштабе 1:20 000 и записку к ней).

Начиная с 1819 г. Сади все больше интересуется непосредственно промышленной техникой (как бы продолжая традицию, начало которой было положено в детстве знакомством с мельницей): он посещает заводы и изучает производство непосредственно в цехах. Даже эти далеко не полные сведения о круге научных и технических занятий С. Карно, несомненно, свидетельствуют о том, что основное направление его интересов было инженерным, нацеленным на решение технических задач, но не сугубо утилитарных, а более общих, требующих научного подхода.

Основным объектом изучения стала паровая машина, от которой, как считал еще Л. Карно, можно было ожидать “удивительных последствий”. Сади постепенно переходил от активного анализа известных конструкций, теорий, данных экспериментов к выработке собственных подходов к закономерностям, лежащим в основе действия тепловых двигателей. Эта работа к концу 1823 г. частично завершилась созданием знаменитой книги “Размышление о движущей силе огня...”. “Частично завершилась” потому, что после выхода книги работа над темой продолжалась и привела к открытиям не менее важным, чем те, которые определили ее непреходящее значение в истории науки. Обо всем этом речь пойдет в дальнейшем.

Для более полной характеристики жизни С. Карно в это время необходимо коснуться еще двух ее сторон — семейной и общественной.

Связь с отцом и братом Ипполитом, жившими в изгнании в Магдебурге, поддерживалась по почте; наконец, в начале лета 1820 г. удалось устроить приезд Ипполита на несколько дней в Париж. На военную службу Ипполит не призывался, так как был еще молод, поэтому он мог вернуться к отцу¹⁾. В следующем, 1821 г. Сади обращается с просьбой к военному министру об отпуске для поездки в Магдебург к отцу и брату. Министр приказом от 23 июня предоставляет ему трехмесячный отпуск без оплаты и разрешение на поездку. Об этом, естественно, были поставлены в известность сотрудники министерства иностранных дел, обеспечивавшие слежку за эмигрантами.

Каких-либо сведений о пребывании С. Карно в Магдебурге нет, однако не подлежит сомнению, что в беседах с отцом речь шла не только о семейных делах: обсуждались и научные поиски Сади, и политическое положение во Франции, и многое другое. Это их свидание было последним: через два года Лазар Карно умер и был похоронен в Магдебурге.

Получив известие о смерти отца, Сади не мог оставаться в Париже. Не имея возможности поехать в Магдебург, чтобы побывать на его могиле, Сади решил отправиться на родину отца в Бургундию. В ноябре он получает двухмесячный отпуск и объезжает места, связанные с молодостью Лазара Карно, в том числе Дижон и Лион.

¹⁾ В дальнейшем Ипполит так и не служил в армии, поскольку, если один из братьев был военнотружущим, другой освобождался от призыва.

Ипполит после смерти отца вернулся во Францию. Братья поселились вместе и не расставались до смерти С. Карно в 1832 г. Материальное положение братьев Карно не было блестящим, но и нужды они не испытывали. Было офицерское жалование Сади и наследство, оставленное отцом.

Общественная жизнь в сфере как политики, так и науки, не вызывала у Сади желания принять в ней активное участие. Естественно, что и по личным убеждениям, и по семейным традициям он оставался республиканцем и противником Бурбонов, но держался в стороне от различных фракций антибурбоновской коалиции и их споров между собой. В отличие от ряда своих коллег по школе в Метце он в 1823 г., когда армия готовилась к походу в Испанию, не рвался в бой и не принял участия в военных действиях. Это была война, непохожая на те, которые вел его отец, и даже не та, в которой участвовал он сам перед окончанием Политехнической школы.

Младший брат Ипполит, напротив, после возвращения в Париж активно включился в общественную жизнь. Он постепенно становится видным адвокатом и публицистом, все больше втягивается в политику, которая в дальнейшем стала основным делом его жизни. Можно сказать, что основная часть талантов “великого Карно” разделилась между его сыновьями: старший унаследовал и развил их научную сторону, младший — политическую. Только военно-организационные способности в сыновьях не проявились, может быть и потому, что подходящих для этого условий уже не было.

Что касается общественных дел в научно-технической сфере, то и здесь Сади не проявлял особой активности. Он не считал нужным стремиться к поддержке каких-либо научных групп, особенно тех (например, общества “филоматиков”), которые были связаны с Академией наук и старались поддержать своих коллег в их попытках попасть в число ее членов. И научный уровень в области, которая интересовала Сади, и характер их деятельности его не устраивали. Единственное общество, в котором он состоял, была Ассоциация выпускников Политехнической школы. Здесь на одном из собраний он изложил соображения о формуле, позволяющей представить двигательную силу водяного пара в зависимости от его параметров.

Уже в это время проявилась черта характера Сади Карно, которая во многом определила судьбу его работ: некоторая, если так можно выразиться, гордая скромность. Он считал, что научная истина сама по себе в силу своей правильности и доказательности должна проложить себе дорогу, без вспомогательных средств в виде вербовки сторонников, поддержки авторитетов и шумной пропаганды. Ни к одному из этих средств он никогда не прибегал. Он и в дальнейшем следовал завету, оставленному его поэтическим тезкой — Саади:

Коль ты умен — напрасно не кричи,
Скажи, как Саади, или молчи.¹⁾

Год 1823-й был переломным в жизни С. Карно. После смерти отца — высшего авторитета для него — Сади остался старшим в семье и полностью ответственным не только за свою судьбу, но и за судьбу младшего брата, вернувшегося из Магдебурга. Было очевидно, что Ипполит продолжит свою общественную деятельность, и политика станет определяющим направлением его жизни. Самому Сади тоже стало ясно, что его основным занятием в жизни независимо от внешних обстоятельств станет научная работа. Вернувшись в Париж после поездки по родным местам, он вплотную занялся рукописью книги, в которой обобщил результаты своих поисков в области теории тепловых машин. Никаких данных, свидетельствующих о том, что он обсуждал содержание рукописи с кем-либо из ученых-коллег, не сохранилось; известно только, что он давал некоторые отрывки читать Ипполиту, который существа дела не понимал, но прошел у отца хорошую литературную школу. Это свидетельствует о том, что Сади уделял существенное внимание форме изложения, стремясь свои мысли сделать понятными и для неспециалистов.

К весне 1824 г. работа над рукописью “Размышления о движущей силе огня...” была закончена. Сади обратился к издателю Жирардо Сен-Эме, которого он знал еще по Политехнической школе и во время учения в Метце, где тот служил артиллерийским лейтенантом. В Париже он наряду с политической занимался и издательской деятельностью под псевдонимом Башелье. Он и выпустил в свет книгу С. Карно в июне 1824 г. тиражом 600 экземпляров; объявление о ее выходе появилось в “Bibliographie de la France” 12 июня 1824 г.²⁾

Анализ содержания этой книги, рассказ о реакции на ее выход и дальнейшей истории развития содержащихся в ней идей невозможны без рассмотрения уровня развития в то время тепловых машин как в инженерной практике, так и в области теории. При этом необходимо учитывать и господствовавшие в научной среде общезысические представления, относящиеся к тепловым явлениям и их связям с механикой.

Теплоэнергетика первой трети XIX века

Практика

Непосредственной технической базой, на которую опирался С. Карно, была практика современной ему теплоэнергетики. Хотя в то время уже велись исследования по созданию двигателей других типов (например, работы братьев Ньепсов по двигателю внутреннего сгорания, о которых говорилось в гл. 1), паровая машина занимала

¹⁾ Саади. Бустан. Лирика. М.: ГИХЛ, 1962. С. 333.

²⁾ Интересное совпадение: в эти же дни (26 июня 1824 г.) родился У. Томсон, будущий лорд Кельвин, один из продолжателей дела С. Карно.

1^{er} cahier

Reflexions sur la Puissance Motrice de feu Chaleur



C'est de monde fait que la Chaleur
peut être la Cause du mouvement, qu'elle
proprie même une grande puissance motrice,
la machiner à vapeur - depuis luy est
répondre en font un grand nombre de parler et
tout par eux.

C'est la Chaleur qui doivent être attribués
les grands mouvements qui se voient dans
regarde sur la terre; c'est à elle qui font
donner par agitation de l'atmosphère, la chute
des pluies et des autres météores, elle de
conduite d'eau qui s'élèvent la surface de
globe et dont l'homme est parvenu à utiliser
une faible partie, enfin les tremblements
de terre, les éruptions volcaniques reconnaissent
aussi pour cause, la Chaleur.

C'est dans cet ouvrage j'espère que nous
pourrons puiser la force motrice nécessaire à
nos besoins, la nature en nous offrant dans
toutes parts, la Ambuffible, nous a donné
la faculté de faire naître en tous lieux, temps
et en tout lieux la Chaleur et la puissance
motrice qui en est la suite, développez cette
puissance, s'appliquez à notre usage, tel est
l'objet des Machines à feu.

Рис. 6. Первая страница рукописи С. Карно “Размышления о движущей силе огня...”

господствующее место. Соответственно и С. Карно в основном мог исходить из опыта, накопленного при создании и эксплуатации именно этих машин (хотя далеко им не ограничился). Поэтому ниже главное внимание будет направлено на развитие паровых машин, вместе с тем затронуты и работы по другим тепловым двигателям, в частности воздушным (в особенности Р. Стирлинга), о которых С. Карно упоминает лишь кратко, сожалея об отсутствии более полных сведений.

Паровая машина занимает особое, исключительное место не только в истории создания тепловых двигателей, но и вообще в истории науки и техники. Это связано по меньшей мере с тремя важными ее особенностями.

Первая заключается в том, что появление паровой машины не ограничилось влиянием на технику и технологию, но через них повлияло на экономику, политику и даже искусство и литературу. Паровая машина стала неким символом исторического периода, известного под названием “века пара” (эта тема могла бы стать, и отчасти уже стала ¹⁾, основой целой серии интереснейших исследований).

Вторая определяется тем, что, как отметил еще Ф. Энгельс в “Диалектике природы”, паровая машина была первым действительно интернациональным изобретением. К ее созданию и совершенствованию приложили свои таланты, знания и опыт англичане Ньюкомен и Уатт, французы Папин и Дезаголье, немец Лейбниц, русский Ползунов, американец Эванс и многие другие.

Наконец, *третья* особенность паровой машины (важная для этой книги) состоит в том, что ее влияние на развитие науки не просто стимулировало развитие каких-то разделов или даже направлений науки, а способствовало возникновению и развитию *новой науки* — термодинамики и соответственно двух фундаментальных законов, известных под названием начал термодинамики. Главным действующим лицом в этом драматическом процессе рождения двух новых законов — сначала второго, а затем и первого — был, несомненно, С. Карно. Здесь в классически чистом виде проявился тот результат влияния техники на развитие науки, о котором говорил Энгельс: если у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку больше, чем десяток университетов. Однако продвижение науки под влиянием практики совершается большей частью не линейно, а по сложному, извилистому и трудному пути; судьба работ С. Карно в этом отношении очень характерна.

Не вдаваясь в историю паровой машины (которая подробно освещена в литературе), остановимся на тех аспектах ее развития, которые в наибольшей степени связаны с работами С. Карно.

Прежде всего необходимо отметить чрезвычайно быстрое распространение паровой машины после 1775 г., связанное прежде всего с результатами работ Дж. Уатта и деятельностью фирмы “Болтон и Уатт”,

¹⁾ См.: Коифедератов И. Я. Джеймс Уатт. М.: Наука, 1969.

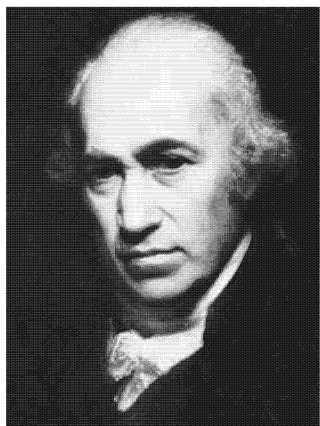


Рис. 7. Джеймс Уатт (1736–1819)

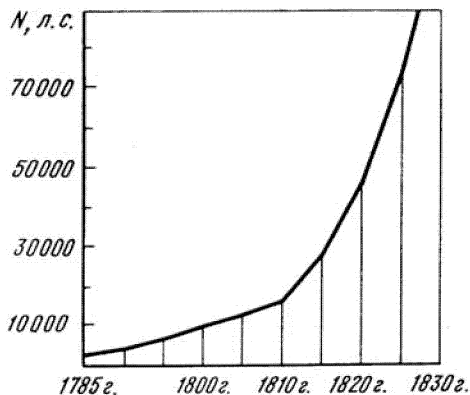


Рис. 8. Суммарная установленная мощность паровых машин в Англии

занимавшей до конца века монопольное положение. За десятилетие с 1775 по 1785 г. эта фирма установила на шахтах и рудниках, а также для водопроводов и дутьевых систем 66 паровых машин общей мощностью 1240 л. с. В следующее десятилетие число установленных машин достигло 144, а суммарная мощность выросла до 2010 л. с. Однако это было только начало: к 1800 г. создаются и другие фирмы, конструирующие и производящие паровые машины. Одновременно сфера их использования существенно расширяется. В начале XIX века она охватила самые различные отрасли производства (кроме шахт), нуждающиеся в универсальном двигателе: фабрики, заводы, мельницы и т. д., а затем и транспорт.

На рис. 8 показан рост суммарной мощности паровых двигателей, темпы их развития. При оценке этих цифр нужно учесть, что в то время ни железнодорожный, ни водный транспорт еще не стали крупными потребителями паровых машин. Господствующее положение в производстве и использовании паровых машин занимала Англия, и не только во времена Уатта, но и в течение всей первой половины XIX века. Во Франции паровые машины начали изготавливать с 1780 г., несколько позже — в германских государствах, с 1800 г. — в США. В России после машины Ползунова (1763 г.) единственные экземпляры были изготовлены на Урале в 1799 г., затем в 1810 г.

Во всех этих странах действовали различные факторы как общественного, так и технического порядка, обусловившие их отставание от Англии. Во Франции, несмотря на высокий уровень науки и наличие первоклассных изобретателей и инженеров, состояние промышленного производства, оставшегося в наследство от дореволюционной монархии Бурбонов, не могло позволить конкурировать с англичанами. Правда, французское правительство еще в 1786 г. (за три года до революции) поддержало планы ученых о закупке в Англии паровых машин Уатта.

В Париж были приглашены Болтон и Уатт; французские академики (Лавуазье, Лаплас, Монж, Бертолле) приняли их с величайшим радушием. Французские министры подготовили сделку с англичанами на распространение их машин во Франции. Однако дальновидный парламент по настоянию премьер-министра Питта запретил сделку.

Весной 1803 г. Уатт снова посетил Париж, где прожил пять недель; его с прежним радушием приняли Лаплас, Бертолле и Монж. В 1808 г. Уатт был избран членом-корреспондентом Института Франции (в 1814 г. — одним из восьми иностранных членов Академии наук). Однако деловые контакты по закупке или производству паровых машин и в это время налажены не были. Правительство Наполеона, старавшееся форсировать развитие французской промышленности, не оценило значение паровой машины для энергетики страны и транспорта. Известная история с неудачными попытками Р. Фультона заинтересовать правительство Франции созданием парового флота достаточно полно отражает эту ситуацию. Нужно кстати заметить, что часто встречающиеся в литературе обвинения Наполеона в близорукости и недооценке предложения Фультона не совсем справедливы. Наполеон высоко оценил своих советников из Института Франции и, принимая решения по техническим вопросам, опирался, как правило, на их заключения. Так было и в случае с Фультоном. Лишь Карно-старший оценил значение парового двигателя для флота, остальные же ученые мужи не проявили в то время интереса к реализации идеи Фультона. Да и в дальнейшем внимание к тепловым, в частности к паровым двигателям в Академии наук было весьма односторонним и ограничивалось лишь общей поддержкой; относительно интенсивно велись только работы по свойствам газов и пара. Недооценка необходимости изучения проблем тепловых двигателей с более общих позиций отразилась в полной мере и в приеме, который был оказан в дальнейшем работе С. Карно (подробнее об этом будет сказано в следующей главе).

Во Франции до 1815 г. были мало осведомлены как о достижениях английских конструкторов тепловых двигателей, так и об их успехах в технологии машиностроения. Подобная информация стала поступать во Францию после того, как контакты между странами были восстановлены. Однако многие работы, проводившиеся в Англии, остались в 20-е годы во Франции мало известными или совсем неизвестными (как, например, по воздушным двигателям Р. Стирлинга).

Для установления связей труда С. Карно с практикой современной ему теплоэнергетики необходимо также проанализировать три конкретных вопроса.

1. В какой степени комплекс процессов, протекающих в паровых машинах, был близок к тем, которые ввел С. Карно в своем цикле.

2. Какие пути повышения эффективности паровых машин искали и реализовали их конструкторы.

3. Как развивались работы по созданию других видов тепловых двигателей.

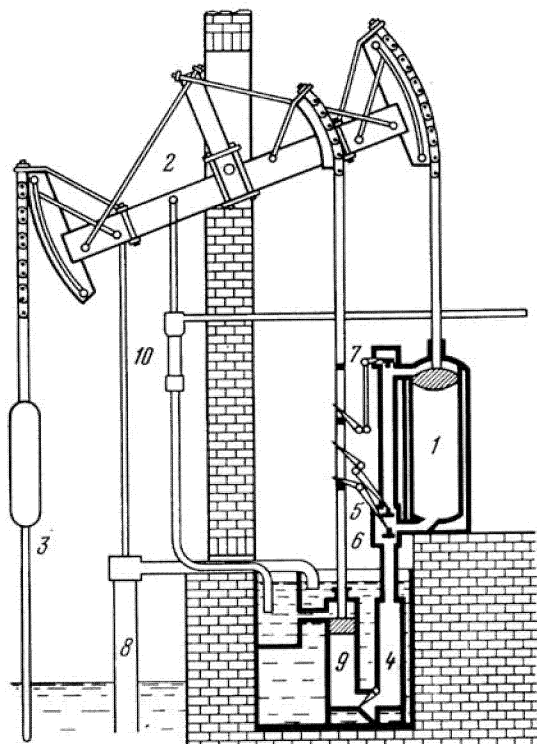


Рис. 9. Паровая машина Уатта образца 1775 г. для привода водяного насоса: 1 — цилиндр, 2 — балансир, 3 — насосная штанга, 4 — конденсатор, 5, 6, 7 — клапаны, 8 — насос охлаждающей воды, 9 — конденсатный насос, 10 — питательный насос

Ответ на первый вопрос может быть найден на основе анализа процессов паровой машины Уатта образца 1775 г. (рис. 9) и сопоставления ее с предшествующими машинами. Машина Уатта завершает этап совершенствования парового двигателя, начавшийся с изобретения Д. Папина (1698 г.). В машине Папина три из четырех основных процессов — генерация пара с подводом тепла, расширение с отдачей работы на поршне и, наконец, конденсация пара с отводом тепла — были сосредоточены в одном устройстве — цилиндре с поршнем¹⁾. Четвертый процесс — откачка конденсата и подача его под необходимым давлением снова на испарение — вообще отсутствовал, поскольку при таком конструктивном исполнении был не нужен.

Первый существенный (можно сказать, революционный) шаг в разведении основных процессов по самостоятельным конструктивным

¹⁾ Идея применения цилиндра с поршнем для использования силы пара была подсказана Папину универсальным гением — Г. Лейбницем (1646–1716).

элементам был сделан Томасом Севери (патент 1698 г.), отделившим котел (парогенератор) от рабочего цилиндра. Тем самым была создана возможность самостоятельного раздельного совершенствования первых двух процессов — генерации пара и производства работы.

Следующие два шага целиком принадлежат к достижениям Уатта. Он выделил конденсатор как самостоятельный элемент паровой машины и тем самым позволил свободно совершенствовать процесс конденсации вне связи с тем что происходит в цилиндре, освобожденном от несвойственных функций, после чего совершенно естественным стал завершающий шаг — установка насосов, подающих воду из конденсатора снова в котел ¹⁾. Таким образом, замкнулся и превратился в цикл комплекс процессов, каждый из которых был четко выделен, поскольку протекал в отдельном конструктивном элементе. Это давало широкие возможности совершенствовать процесс в каждом из них (например, в цилиндре путем введения отсечки впуска, что предложил и осуществил тоже Уатт).

В таком виде, с изменениями, не имеющими принципиального, качественного характера, паровая машина “дожила” до того времени, когда ее изучением занялся С. Карно. Можно констатировать, что все основные элементы, которые могли служить основой для глубокого теоретического анализа цикла тепловой машины, практика выработала уже к концу XVIII века, однако никто, кроме Карно, не сумел этого сделать. Как мы увидим дальше, все теоретики, если так можно выразиться, “застряли в цилиндре” машины, изучая частные процессы. Никто из них не смог подняться до мысли проанализировать комплекс процессов в целом, абстрагируясь от важных, но все же второстепенных частностей.

Ответ на второй вопрос — о путях повышения эффективности паровых двигателей — следует разделить на две части. Можно говорить как о конструктивных решениях, так и о поисках, связанных с изменением параметров рабочих процессов в машинах. При всей важности усовершенствований конструкций паровых машин (использование двух цилиндров, совершенствование парораспределения, использование паровой рубашки цилиндров, более удобные способы преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное вала с маховиком и т. д.) для нас более существенно изменение параметров рабочего тела — пара. В этой части основным направлением стало повышение начального давления. Еще в 80-х годах Уатт понимал, что повышение давления пара позволяет при том же его расходе увеличить получаемую в цилиндре работу. Однако он не пошел на это, зная, что технологические трудности которые нужно преодолеть для надежной работы машины при повышенных давлениях в котле и цилиндре, еще

¹⁾ То обстоятельство, что в машине Уатта было два насоса — конденсационный и питательный, разделенные водяной ванной, находящейся под атмосферным давлением, — в принципе дела не меняет.

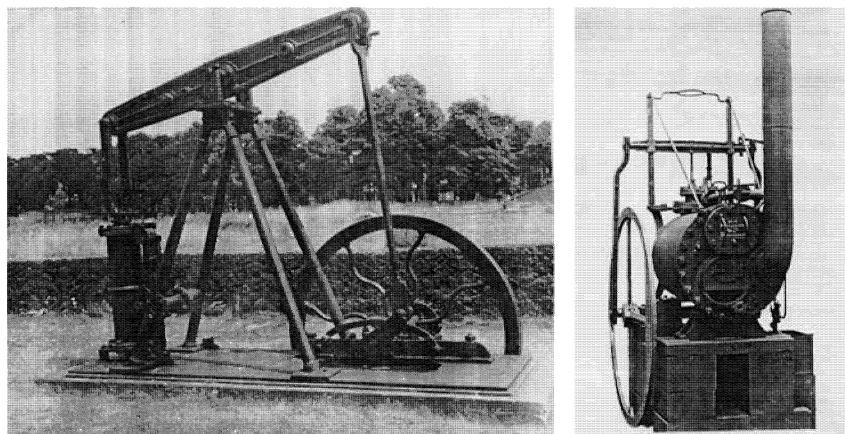


Рис. 10. Стационарная машина фирмы “Хьюлетт” 1805 г. (слева) и транспортная машина Тревитика 1805 г. (справа)

слишком велики. Кроме того, существовала довольно распространенная теория, что повышение давления пара не приводит к уменьшению удельного расхода топлива. Тем не менее работа в этом направлении постоянно велась.

Она подкреплялась и рядом публикаций, например американского инженера О. Эванса и француза О. Бубье (относящихся к 1810–1820 гг.), в которых доказывалась эффективность высокого давления пара, хотя соображения, приводимые ими, были довольно путанными и не имели серьезного научного обоснования. В середине 10-х годов XIX века инженер из Корнуэлла А. Вульф создал двухцилиндровую компаунд-машину с начальным давлением пара 3 атм., что вызвало сенсацию в Англии, а затем и во Франции, куда машину стали экспортировать. По сравнению с машинами Уатта она сэкономила до 50% топлива. Комиссия британского парламента, обследовавшая машину Вульфа, установила это простым расчетом: “На каждый четверик израсходованного угля она могла смолотить 18 четвериков хлеба, а машина Уатта на то же количество угля только 12”.

Разрабатывались и другие машины с повышенным давлением. Примером могут служить две машины, несколько опередившие современный им уровень техники, показанные на рис. 10 (рабочее давление пара до 8 атм.). Однако все они, как и машина Вульфа, “привились” не сразу, так как в начале были менее надежны и удобны в эксплуатации. Трудности, которые предвидел Уатт, преодолевались шаг за шагом. Об этом свидетельствуют статистические данные, собранные Трестом:

Год	Давление, атм.	Год	Давление, атм.
1800	1,00–2,35	1840	2,05–2,46
1820	1,35–1,70	1850	2,05–2,71
1830	1,70–2,40	1860	2,71–3,11

Лишь к концу века (1900 г.) эти величины достигли значений 10–15 атм.

Таким образом, Карно мог наблюдать только начало роста используемого в двигателях давления пара и связанного с ним уменьшения удельного расхода топлива. Несмотря на это, он правильно оценил значение и перспективу этой тенденции, связав увеличение эффективности теплового двигателя не просто с начальным давлением рабочего тела (в частном случае — пара), а с его *температурой*.

Дальнейших ход событий показал правильность прогноза Карно. Современная тепловая электростанция в своей паротурбинной части представляет собой, по существу, паровую машину с предельно высокой температурой пара.

Третий вопрос — о развитии других видов тепловых двигателей в период, предшествующий работе Карно, — связан с двумя направлениями поисков. Это прежде всего, по современной терминологии, двигатели внутреннего сгорания. Работы в этом направлении, проводившиеся братьями Ньепс во Франции, были хорошо известны С. Карно, поскольку с ними был непосредственно связан как эксперт его отец. С. Карно уделил этим исследованиям существенное место в своей книге, они позволили ему правильно определить возможности двигателей внутреннего сгорания и наметить пути их дальнейшего развития.

Что касается другого направления поисков новых тепловых двигателей — создания машин, работающих на горячем воздухе (двигатели внешнего сгорания), то здесь ситуация сложилась менее благоприятно. Основная и весьма успешная работа по таким двигателям велась в Англии Р. Стирлингом, ее результаты во Франции не были известны: до Карно доходили лишь неясные слухи. Но и этого оказалось достаточно, чтобы дать верную оценку возможностей таких машин.

Стирлинг, по существу, пришел к выводам, близким к тем, которые следовали из работы Карно, но совсем другим путем — в чисто английском плане: практическом, деловом. Теоретического анализа процессов в машине он не делал, а просто руководствовался здравым смыслом, исходя из известных свойств газов. Но из текстовой части полученных им патентов видно, что он совершенно ясно представлял, в каком направлении нужно действовать, чтобы повысить эффективность двигателя. Цикл, который он придумал и осуществил (впоследствии названный циклом Стирлинга), как и цикл Карно, не был долгое время оценен по достоинству. Только А. И. Вышнеградский в 1874 г. дал его теоретический анализ, который послужил в дальнейшем основой для достаточно общих термодинамических разработок.

Подводя итоги обзору состояния теплоэнергетической силовой техники первой трети XIX века, можно констатировать, что тогда существовало три основных ее направления: паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и газовые двигатели внешнего сгорания. Только первое из них получило относительно широкое практическое применение, хотя тоже было далеко от полного использования заложенных в нем возможностей. Два других направления находились в начальной стадии развития (причем несколько впереди по

достигнутым практическим результатам были двигатели Стирлинга). Тем не менее общий технический уровень паровых машин в сочетании с некоторым опытом и идеями по другим типам двигателей обеспечивал практическую базу для выработки теории тепловых двигателей и прогнозирования будущего их развития. Однако достаточно общая теория такого рода должна опираться и на определенный научный задел как фундаментального, так и прикладного характера. Каков был уровень этого задела к 20-м годам XIX века, когда С. Карно приступил к созданию общей теории тепловых двигателей?

Теория

Обзор ситуации в области создания и совершенствования тепловых машин, проведенный в предыдущем разделе, ясно показывает, что в основе большей части технических решений, осуществлявшихся их конструкторами, лежали чисто практические соображения — предыдущий опыт, здравый смысл и инженерная интуиция. Отдельные исследования свойств водяного пара и газов служили (и то далеко не всегда) лишь вспомогательным материалом. Но и его часто не хватало. Оставалось вполне справедливым замечание И. И. Ползунова, что по отношению к паровым машинам “теория многим слабее практики”, хотя оно относилось еще к XVIII веку. Такой эмпирический стиль инженерного проектирования, характерный в особенности для английской инженерной школы, господствовал примерно до середины XIX века, и лишь позднее и очень медленно он начал уступать место научно-экспериментальному подходу.

От науки требовалось в это время только одно — определить свойства воды и пара (для паровых машин) и воздуха (для газовых). Из 20 технических решений Уатта 9 исходили из практики и 11 — из теоретических соображений, причем последние имели совершенно определенный локальный смысл: они относились только к свойствам жидкой воды и водяного пара. Они базировались на собственных экспериментальных исследованиях Уатта. Он вел исследования по трем направлениям. Во-первых, установил удельный объем насыщенного водяного пара при 1 атм. Полученное им значение ($1800 \text{ м}^3/\text{кг}$) находится довольно близко к современным данным — $1675 \text{ м}^3/\text{кг}$. Во-вторых, повторил опыты своего друга Д. Блека ¹⁾ и получил достаточно точную величину теплоты парообразования воды при атмосферном давлении — 2295 кДж/кг (что расходится с современными данными всего на $0,7\%$). Наконец, определил зависимость давления насыщенного водяного пара

¹⁾ Джозеф Блек (1728–1799) — шотландский врач и физик, профессор университетов Глазго (1756–1766) и Эдинбурга (1766–1797), основоположник калориметрической теплофизики. Ввел понятие “скрытой” теплоты плавления и испарения и провел первые их измерения для воды. Показал различие понятий теплоты и температуры. Ввел понятие теплоемкости (1770 г.). Был членом ряда академий, в том числе Петербургской.

от температуры. Этим занимался еще Д. Папин в 1680 г., но он установил только качественно связь между этими величинами. Уатт и здесь получил точные данные; практически они совпали с теми, которые (правда, в более широком диапазоне) получили сначала Ф. Араго и П. Дюлонг в 20-е годы, а затем А. Реньо уже в конце 40-х и в 50-е годы.

В сознании даже самых талантливых конструкторов, таких, например, как Уатт или Стирлинг, не возникала мысль о необходимости какой-то общей абстрактной физической теории, которая определила бы генеральное направление поисков и граничные возможности паровых машин. Просто в этом еще не возникала настоятельная необходимость, хотя бы потому, что не были исчерпаны резервы, лежавшие “на поверхности” и очевидные без вмешательства науки. В то же время под влиянием непосредственных запросов практики, возникавших при реализации известных идей, развивались конкретные исследования термических и калорических свойств пара и газов, проводимые профессиональными исследователями-физиками ¹⁾.

Такой подход объяснялся просто. Процессы в паровых машинах рассматривались с позиций того, что происходило в цилиндре (или цилиндрах). Задача заключалась в том, чтобы получить от пара (или воздуха) больше работы. Все остальное, в том числе котел (у паровых машин), было только средством получения пара или воздуха нужных параметров. Ни о каких превращениях тепла речи быть не могло, поскольку в умах безраздельно господствовала вещественная теория тепла — представление о нем как о некоей невесомой жидкости, перетекавшей от одного тела к другому.

Вопрос о том, откуда в конечном счете берется работа, тоже не возникал — пар (или воздух) давил на поршень, и этого было достаточно, чтобы определить движущую силу (работу). Все, что лежало за пределами такой постановки, инженеров пока не интересовало — они были заняты конкретными делами. Физики в своих поисках тоже были далеки от общей постановки проблемы: их умы были направлены на задачи совсем другого плана, требующие для своего решения серьезного математического аппарата (как, например, работы Лагранжа, Фурье и других французских ученых, находившихся на передовой линии тогдашней физической науки). Эти задачи решались на высоком уровне абстракции, но всегда сводились либо к механике твердого тела, жидкости или газа, либо к изучению законов движения потока теплоты, рассматриваемой как некий флюид, движущийся вследствие градиента температур. Тепловые явления (например, теплопроводность) тоже рассматривались с этих позиций.

Ситуацию этого периода, относящуюся к учению о теплоте и работе, очень выразительно показал Ф. Энгельс в “Диалектике природы”:

¹⁾ Естественно, параллельно с этим активно шли работы по механике и улучшению конструкционных материалов — эта тема относится уже к другой области.

“практика по-своему решила вопрос об отношениях между механическим движением и теплотой: она сперва превратила первое во второе, а затем второе в первое. А как обстояло дело с теорией?”

Хотя именно в XVII и XVIII веках бесчисленные описания путешествий кишели рассказами о диких народах, не знавших другого способа получения огня, кроме трения, физики этим почти совершенно не интересовались; с таким же равнодушием они относились в течение всего XVIII и первых десятилетий XIX века к паровой машине.”¹⁾

Конечно, не следует это высказывание Энгельса понимать в том смысле, что ученые-физики были вообще равнодушны к паровой машине. Напротив, они прекрасно понимали ее значение для развития промышленности и транспорта и всячески способствовали ее распространению. Они не только писали на эту тему книги и статьи, но и воздействовали в этом отношении по мере сил даже на политиков: например, знаменитый французский физик Ф. Араго трижды произносил в парламенте речи в пользу паровых машин (7 и 8 мая 1834 г. и 28 марта 1835 г.). Но ученые были равнодушны к паровой машине как *к объекту глубокого научного исследования*, не понимая, к каким глубочайшим физическим обобщениям такое исследование может привести. В этом отношении очень показательна большая работа Ф. Араго “Историческая записка о паровых машинах”, опубликованная сначала в виде статьи (1829 г.), а затем и двумя отдельными изданиями (в 1869 г. вышел и ее русский перевод).

Отметим любопытную деталь: в работе Ф. Араго нет ни одной ссылки на книгу С. Карно, которая вышла за пять лет до этого. Араго знал о ней, так как присутствовал на заседании в Академии наук 14 июня 1824 г., где П. Жирар сделал сообщение о труде Карно²⁾. Араго несомненно слышал о ней и позже. Даже в том томе “Revue Encyclopedique”, в котором впервые была опубликована работа Араго, приводится список книг, имеющих на складе издательской фирмы Башелье, и в их числе указана книга С. Карно “Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу” (там же числятся и все основные труды Л. Карно, но в отличие от сына его имя в списке не указывается: очевидно, считалось, что для столь знаменитого человека достаточно одной фамилии). То, что Араго не упоминает о С. Карно, конечно, не случайность. Он подробно излагает историю паровой машины, отвергая как истинный французский патриот “точку зрения о том, что заслуга ее создания принадлежит только англичанам”, затем касается множества важных, но частных вопросов, связанных с конструированием и эксплуатацией паровых машин.

В первой части работы описываются в общей форме, без каких-либо чертежей, расчетов и количественных характеристик, основные части

¹⁾ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Т. 20. С. 391.

²⁾ Интересно отметить, что Араго в своей известной хвалебной речи о Л. Карно, произнесенной в Академии наук в 1837 г., тоже ни словом не упомянул о его сыне С. Карно.

паровых машин (коромысло, маховик, центробежный регулятор, механизм парораспределения, предохранительный клапан и др.) и история их совершенствования. Вторая часть работы — подробный и практически несомненно ценный для своего времени разбор причин взрывов паровых машин (вернее, паровых котлов) и способов их предотвращения.

В связи с этим Араго приводит таблицу упругости насыщенного пара воды в зависимости от температуры по данным своих экспериментов и расчетов, проведенных совместно с П. Дюлонгом. Они охватывают интервал от 1 до 24 атм. (эксперимент) и от 24 до 50 атм. (расчет). Характерно, что автор рассматривает полезность этих данных только с точки зрения обеспечения прочности котла, а не работы машины в целом. В конце работы Араго доказывает правильность мер государственного надзора за безопасностью эксплуатации паровых машин. Здесь снова чувствуется хорошее знание практики. Что касается теории, то Араго не возвысился над уровнем своего времени. Пользу отсечки пара, предложенной Уаттом, он видит в предотвращении ударов поршня в конце хода и уменьшении расхода пара — не вникая в его причины. Появление машин высокого давления объясняет только то, что в этом случае, используя выхлоп в атмосферу, можно обойтись без конденсатора, требующего много воды.

Однако в этом труде бесполезно искать какие-либо попытки разобрататься с общих позиций в энергетических преобразованиях, происходящих в паровой машине, понять, откуда берется в ней работа и где предел, до которого ее можно извлекать. Мысль о такой постановке задачи не приходит Араго (хотя С. Карно это уже сделал, можно сказать, у него на глазах). Здесь явно просматривается различие между “знать” и “понимать”. Араго прекрасно знал паровые машины, в некоторых деталях, может быть, даже лучше, чем С. Карно. Но более глубокое проникновение в существо дела — “понимание” — было ему недоступно. Именно поэтому все, что изложил в своей книге С. Карно, не было понято Араго.

Как мы говорили, в то время у инженеров-практиков не было необходимости в создании общей теории взаимных связей тепла и работы, а у ученых-физиков не возникало к ней интереса. Но изучение свойств пара и газа, напротив, было настоящей практической необходимостью, поэтому физики вслед за инженерами (например, Уаттом) такими исследованиями начали заниматься. Перед тем как перейти к более подробной характеристике научных концепций природы тепла, кратко рассмотрим эти работы.

Первые (после Уатта и его предшественников) исследования свойств водяного пара были проведены Бетанкурром (1790 г.), Дж. Соутерном (1803 г.) и Дж. Шарпом (1806 г.). Они не оставили существенного следа в науке. Но уже в то время к подобным исследованиям подключились такие крупные ученые, как Ж. Гей-Люссак и Дж. Дальтон.

Гей-Люссак занялся этой работой по предложению К. Бертолле; ее результаты были доложены в Институте Франции 18 января 1802 г.,

а затем в том же году опубликованы ¹⁾. Вывод в конце этой работы позволил сформулировать закон, известный в дальнейшем под названием закона Гей-Люссака: “Описанные выше опыты, произведенные мною с величайшей тщательностью, ясно показывают, что атмосферный воздух, кислород, водяной пар, азот, аммиак, углекислый газ при одинаковом повышении температуры расширяются в равной мере, и что, следовательно, величина расширения не зависит от различных физических свойств и особой природы этих тел, и что все газы вообще, насколько я могу заключить, при одинаковом давлении расширяются от теплоты одинаковым образом”. Это была первая формулировка закона Гей-Люссака. Коэффициент объемного термического расширения, по данным Гей-Люссака, составлял $1/266 \text{ град}^{-1}$. Отсюда он определил довольно точно и значение абсолютного нуля (-267°C), считая, что по мере охлаждения объем газа должен стремиться к нулю.

Аналогичные работы провел в Англии Дж. Дальтон, но точность его данных была значительно ниже. Абсолютный нуль (“уровень абсолютного холода”), по Дальтону, должен был находиться где-то около -860°C .

Не менее важное значение для тепловых машин имело знание теплоемкостей газов и пара при постоянном давлении (c_p) и постоянном объеме (c_v). Первые практически пригодные результаты измерения теплоемкостей c_p газов получили и опубликовали в 1813 г. Ф. Делярош и У. Берар. Они существенно модернизировали калориметр (который не позволил ранее Лавуазье и Лапласу получить надежные результаты), отказавшись от льда и использовав вместо него воду. Таким образом, количество тепла, отводимого от потока газа, определялось не по количеству растаявшего льда и теплоте его плавления, а по повышению температуры определенного количества воды. Они получили вполне надежные данные для воздуха, водорода, кислорода, водяного пара и других газов при атмосферном давлении.

Что касается теплоемкости c_v , то здесь дело обстояло сложнее не только в экспериментальном, но и в теоретическом плане. Из наблюдений было известно, что при сжатии (т. е. уменьшении удельного объема газа) температура его растет, а при расширении — снижается. Это очень хорошо объяснялось теорией теплорода, поскольку считалось, что каждое тело (в данном случае газ) при температуре, отличной от абсолютного нуля, содержит определенное количество теплорода. При сжатии газ нагревается и отдает теплород, а при расширении охлаждается, получая недостающий ему теплород от окружающих тел. Отсюда неизбежно следует тезис о том, что сжатый газ должен иметь меньшую теплоемкость, чем расширенный (поскольку при меньшем объеме и большей плотности в него может “влезть” меньше теплорода). Этой точки зрения придерживались практически все физики, в их числе был и Дж. Дальтон, излагавший эту позицию в работе “О теплоте и холоде при механическом сжатии и разрежении воздуха” (1802 г.). Из

¹⁾ Annales de chimie. 1802. V. 43. P. 137–175.

нее логически следовал вывод о том, что предельно разреженный газ должен иметь максимальную теплоемкость — поскольку в нем места для теплорода более чем достаточно. Дело дошло до того, что такие серьезные физики, как Дезорм и Клеман, утверждали, что измерили теплоемкость вакуума. Было и другое авторитетное экспериментальное подтверждение: уже упомянутые выше Делярош и Берар, продолжив свои эксперименты по определению теплоемкости газов при более высоких давлениях, чем атмосферное, получили для сжатого воздуха большее значение теплоемкости. Много позднее, уже в 40-х годах, Реньо показал, что они допустили ошибку при измерениях, но до этого данные Деляроша и Берара еще долго вносили путаницу в умы исследователей.

Интересно, что еще в 1807 г. Гей-Люссак провел свои знаменитые опыты с двумя баллонами. Результаты этих опытов помогли в дальнейшем не только прояснить вопрос о теплоемкостях газов, но и позволили С. Карно, а затем и Р. Майеру вывести принцип эквивалентности тепла и работы. Но в то время ни сам Гей-Люссак, ни его современники не поняли глубокого смысла полученных им результатов.

Опыт Гей-Люссака ясно описан им самим ¹⁾. Поскольку его результаты очень важны для дальнейшего изложения, приведем соответствующую цитату: “Я взял два баллона емкостью в двенадцать литров каждый. На одном из тубусов ²⁾ каждого баллона были установлены краны, в другой тубус каждого баллона были вставлены очень чувствительные спиртовые термометры, позволяющие фиксировать температуру с точностью до сотых долей градуса Цельсия. Для избежания влияния влажности в каждый баллон был помещен хлористый кальций... Эвакуировав оба баллона и убедившись в их герметичности, я наполнил один из баллонов газом, с которым производился опыт. Спустя примерно 12 часов я соединил баллоны свинцовой трубкой и открыл краны. Газ тогда устремился в эвакуированный баллон и перетекал до тех пор, пока не установилось равенство давлений в обоих баллонах. Во время перехода газа менялись показания термометров, которые я тщательно отмечал”.

Результат независимо от природы газа (воздух, водород, углекислый газ) всегда получался один и тот же: температура газа в баллоне, из которого он выходил, понижалась ровно на столько же, на сколько повышалась в баллоне, куда он втекал. Гей-Люссак резюмировал этот результат так: “...изменения температур в обоих баллонах равны” (добавим “и противоположны по знаку”, это очевидно). Следовательно, если дать температурам уравняться, то установится средняя температура, в точности равная начальной. А это в корне подрывает теорию о том, что теплоемкость растет с понижением давления — ведь давление уменьшилось вдвое (то же количество газа заняло двойной объем),

¹⁾ Впоследствии соответствующая схема была воспроизведена С. Карно в его записках.

²⁾ Каждый баллон имел две горловины (тубуса).

а температура осталась прежней! Если теория теплорода верна, то температура должна была бы понизиться.

Эта работа Гей-Люссака была опубликована в не очень популярных трудах Аркельского научного общества, поэтому была относительно мало известна. Однако отсутствие резонанса, которого она заслуживала, связано не с этим: ее именитый автор без труда мог опубликовать статью в более солидном издании, но и над ним, и над его коллегами довели неверные данные Деляроша и Берара для сжатых газов, хорошо согласующиеся с вещественной теорией тепла. Влияние классического опыта Гей-Люссака с двумя баллонами на развитие науки было официально оценено только через 150 лет, в 1957 г., когда он был успешно повторен на современном уровне экспериментальной техники¹⁾.

Вопрос о значениях теплоемкости c_v был решен впервые, как ни странно, в ходе того самого эксперимента 1819 г., посредством которого Клеман и Дезорм пытались определить теплоемкость вакуума. Они нашли, что отношение c_p/c_v для воздуха равно 1,357, что отличается от действительного (1,41) меньше чем на 4%. Позже, в 1829 г., П. Дюлонг вычислил на основе идеи Лапласа это отношение для воздуха и других газов по скорости звука. Он получил для воздуха значение c_p/c_v около 1,4 и, кроме того, указал (правильно), что оно не одинаково для всех газов. Таким образом, значения c_v (правда, косвенно) были определены достаточно надежно²⁾.

Перечисленные исследования в сочетании с законами Бойля—Мариотта и Гей-Люссака позволяли проводить расчеты процессов, протекающих в газах при неизменных температуре, давлении или объеме. Однако для проектирования и анализа тепловых двигателей был особенно важен процесс изменения параметров газа, протекающий без отвода и подвода тепла — тот, который впоследствии, в 1853 г., был назван (У. Ранкином) адиабатным. Анализ такого процесса впервые был проведен в 1807 г. С. Пуассоном, который вывел уравнение, известное теперь под его именем:

$$p_1/p_2 = (\rho_1/\rho_2)^k,$$

где p — давление, ρ — плотность, а $k = c_p/c_v$.

В 1823 г. он развил эту тему еще в двух статьях более подробно с некоторыми дополнениями. Не анализируя методику его вывода (она подробно описана в литературе), отметим тот интересный факт, что Пуассон сделал его на основе теории теплорода.

А. Ван-дер-Ваальс, анализируя методику вывода Пуассона, писал, что его доказательство “замечательно тем, что оно предполагает первое начало термодинамики, хотя Пуассон исходит из теории теплорода, и своим методом он мог бы доказать несостоятельность этой теории, если

¹⁾ Potter J. The Gau-Lussac free Expansion Experiment // American Soc. Naval Eng. 1959. V. 71. P. 643.

²⁾ Непосредственно значения c_v были измерены намного позже — только в 90-х годах XIX века.

бы глубже вник в ее противоречия”¹⁾. Он, несомненно, это противоречие чувствовал, так как отметил, что для определения использованной им функции, аргументом которой было количество теплорода, “необходима новая гипотеза”.

К этому можно добавить, что данный случай — один из классических примеров того, как на основе неверной теории можно получить абсолютно правильный вывод, что можно сделать, только обладая исключительным научным талантом. В этом смысле Пуассон может рассматриваться как предшественник С. Карно, который дал решение уже на более высоком уровне обобщения. С. Карно, как известно, разработал свою теорию, послужившую основой целой новой науки, тоже в начале исходя из концепции теплорода. Он тоже понимал необходимость пересмотра этой теории и (в отличие от Пуассона) такой пересмотр совершил.

Прежде чем перейти к анализу работ С. Карно, необходимо кратко остановиться на причинах, обусловивших удивительную живучесть вещественной теории теплоты. Почему она продолжала господствовать, несмотря на все большее число противоречащих ей экспериментальных фактов и мнения целой плеяды крупных ученых, защищавших молекулярно-кинетические представления о природе теплоты? Причины этого на первый взгляд парадоксального феномена становятся очевидными, если рассмотреть уровень “работоспособности” обеих теорий с точки зрения потребностей развития науки второй половины XVIII и начала XIX века.

История корпускулярной теории тепла начинается (если не считать античных атомистов) с XVI века (Д. Кардано), но более определенные доводы в ее защиту были сделаны позже. Здесь нужно прежде всего упомянуть Р. Гука. В своем труде “Микрография” (1665 г.) он писал: “Теплота есть не что иное, как быстрое и сильное колебание частиц тела...” Р. Бойль, придерживавшийся тех же взглядов, четко определил, что “сущность теплоты состоит во внутреннем движении частичек тела” (1685 г.). Среди других он приводит как одно из самых наглядных доказательств правильности такого взгляда нагревание куска железа при ударах молотом. Удары “приводят частицы железа в движение, и железо, будучи ранее холодным, нагревается благодаря этому движению частиц”. Среди сторонников корпускулярной теории были и выдающиеся философы, такие, как Ф. Бэкон, Д. Локк, Р. Декарт. В XVIII веке ее разделяли и отстаивали сначала Д. Бернулли, а затем и М. В. Ломоносов.

¹⁾ Ван-дер-Ваальс А., Констамм Ф. Курс термостатики. М.: 1936. Т. 1. С. 96.

Бернулли, по существу, дал в “Гидродинамике” (1738 г.), которую он подготовил, еще работая в Петербургской Академии наук, первый набросок молекулярно-кинетической теории, связав ее с законом Бойля—Мариотта; более того, на этой основе он, по существу, ввел понятие идеального газа и отметил его различие с реальными газами. В отличие от своих предшественников Бернулли провел исследования, придав им четкую математическую форму. В том же направлении следовала работа Ломоносова “О природе тепла и холода” (1745 г.), поддержанная Л. Эйлером. Ломоносов объясняет с позиций корпускулярной теории тепла теплопроводность, испарение, плавление, тепловое расширение, вводит представление о вращательном движении частиц тел.

Однако, несмотря на глубину и значимость этих работ, они не были оценены вплоть до середины XIX века. Теория теплорода создала непроницаемую преграду, о которую разбивались все самые неопровержимые доводы сторонников корпускулярной теории. Эта, казалось бы, парадоксальная ситуация объясняется не какими-либо субъективными особенностями ведущих ученых, а действием объективных факторов. Главный из них — это отсутствие настоящей необходимости рассматривать тепловые явления в связи с другими формами движения, в частности со взаимными преобразованиями тепла и работы. То, что именовалось на русском языке “теплотвором” или “теплородом” (“calorique” у французов, “caloric” у англичан и “Wärmestoff” у немцев), никак не связывалось с механической работой.

Техника предъявила свои требования серьезно разобраться в связях тепла и работы, их превращениях только к середине XIX века; С. Карно был первым, кто понял необходимость этого на два десятилетия раньше. Его труд и стал первым и опережающим ответом на запросы техники. Тогда и наступило начало неотвратимого конца теории теплорода (хотя ее сторонники долго и отчаянно сопротивлялись).

Однако в XVIII и начале XIX века вещественная теория тепла, несмотря на некоторые шероховатости, вполне отвечала требованиям исследователей тепловых явлений. Объяснялось это тем, что они имели дело с процессами, в которых теплород (в некоторых, даже современных, работах в этом же смысле используется слово “теплота”) системы либо передавался другому телу, либо перераспределялся в пределах одного. Поскольку в обоих случаях внешняя работа отсутствовала, соблюдалось условие неизменности его количества. Это полностью укладывалось в представление о теплоте как “тонкой материи”, которую содержит в себе “всякое тело в свойственном его состоянию количестве”.

В условиях этих ограничений вещественная теория тепла работала безупречно. Она одинаково хорошо объясняла результаты как относительно простых калориметрических исследований Блека, Крафта и Рихмана, так и более сложных и математически обобщенных работ Био

и Фурье по распространению тепла в твердом теле. Феномен теплового излучения также укладывался в рамки вещественной теории: тепловые лучи переносили теплород от одного тела к другому. Даже выделение тепла при трении тел (правда, с некоторыми допущениями) объясняли тем, что трение переносит теплород в тело из окружающей среды. Если исключить последний пример, то молекулярно-кинетическая теория не могла представить конкурентоспособную и столь же наглядную, пригодную для расчетов модель. Правда, в Англии начала XIX века механическая теория тепла все же имела наряду с вещественной ограниченное распространение. Сказывались традиции, идущие еще от Гука и Бойля. Не были забыты и опыты Румфорда и Дэви, в которых происходило выделение тепла в результате только механических воздействий (сверление пушек в первом случае и трение двух кусков льда во втором). Во Франции влияние механической теории было намного меньше. Поэтому нет оснований удивляться тому, что Лавуазье и Лаплас, стоявшие на переднем крае науки своего времени, принимали теорию теплорода.

Вместе с тем, чувствуя ряд слабых мест вещественной теории тепла, они заняли при сопоставлении обеих теорий гибкую позицию, признавая и определенную силу доводов сторонников молекулярно-кинетических представлений. В конечном счете их точка зрения была выражена одной ключевой, но более дипломатичной, чем научной фразой: “Возможно, обе теории справедливы одновременно”. Тем не менее вещественная теория тепла, возникшая (как, впрочем, и молекулярно-кинетическая) еще в Древней Греции, господствовала вплоть до середины XIX века, но и после утверждения первого закона термодинамики она еще долго не сходила со сцены.

Исключительная живучесть вещественной теории тепла (по той же причине простоты и наглядности) проявляется даже и теперь, в начале XXI века, через 2000 с лишним лет после ее возникновения. Это сказывается не только в широком использовании таких терминов, как “теплоноситель”, “теплоемкость”, “аккумулятор тепла”, “теплоперенос”, подмене понятия “внутренняя энергия” выражением “тепловая энергия” и др. Во многих работах не изжито и само представление о “содержании” или “накоплении” тепла в теле либо веществе и даже приводятся соответствующие расчеты этого тепла. О путанице, вносимой такими пережитками старины, весьма выразительно говорится, например, в курсе термодинамики К. А. Путилова ¹⁾.

Однако вернемся в первую четверть XIX века и констатируем, что, несмотря на господство вещественной теории тепла и отсутствие достаточного интереса физиков к теоретическому анализу фундаментальных основ работы тепловых двигателей, условия для нового, решающего шага, ведущего к созданию основ термодинамики тогда уже созрели. Об этом кратко и точно сказано в курсе термодинамики И. Р. Кричевского: “Открытие этого закона (эквивалентности тепла и

¹⁾ Путилов К.А. Термодинамика. М.: Наука, 1971. С. 41.

работы и, следовательно, полного отказа от вещественной теории тепла — В. Б.) могло произойти в любое время после 1823 года. Уравнение состояния газа было установлено. Гей-Люссак провел свой опыт. Делярош и Берар измерили теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Пуассон вывел уравнение для отношения c_p/c_v . Дезорм и Клеман провели свой опыт. Лаплас правильно объяснил опыт Дезорма и Клемана. Вычисление c_p/c_v по уравнению Пуассона стало возможным. Вся подготовительная работа для открытия закона была выполнена. Не хватало только одного — понимания смысла полученных результатов”¹⁾.

Казалось бы, в этих обстоятельствах далее все должно было произойти в последовательности, диктуемой логикой. Раньше или позже должен был появиться гениальный ученый, понявший смысл полученных его предшественниками результатов, обобщивший их на новом, более высоком уровне и открывший первый закон термодинамики в форме эквивалентности тепла и работы. Он неизбежно должен был столкнуться с необходимостью ввести понятие внутренней энергии (что и сделал впоследствии Клаузиус). Тогда все известные к тому времени процессы, в ходе которых исчезало то или иное количество работы, имели бы четкое объяснение: получалось приращение внутренней энергии и выделялось тепло, сумма которых неизбежно равнялась затраченной работе. И напротив, при затрате тепла получалось изменение внутренней энергии и работа, сумма которых опять же равнялась затраченному теплу. Если же внутренняя энергия оставалась неизменной, то в любом случае тепло и работа были однозначно эквивалентны. Все это вместе соответствовало более общему закону — сохранения энергии.

Естественно, нужна была какая-то временная пауза, чтобы этот фундаментальный закон был бы понят и усвоен.

Однако со временем снова должно было выявиться, что этого недостаточно. Принцип эквивалентности тепла и работы не объяснял явно проявившейся к тому времени асимметрии в их взаимных превращениях. Если получать тепло путем затраты работы можно было относительно просто (это умели делать, например, еще в древности трением), то обратный процесс получения работы посредством затраты тепла оказался чрезвычайно трудным. Чтобы это сделать, пришлось сооружать сложные машины, не идущие ни в какое сравнение с теми простыми устройствами, которые легко преобразовывали работу в тепло. Но и они преобразовывали в работу ничтожную часть тепла, не превышавшую нескольких процентов. Почему в соответствии с законом эквивалентности все тепло не превращалось в работу? Может быть, есть иной путь? И если это невозможно, то чем ограничивается такое превращение? Возникает новая задача, не менее, а может быть, и более сложная, чем первая. И должен появиться еще один научный гений, который, опираясь на первый закон, нашел бы и сформулировал

¹⁾ Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. М.: Химия, 1970. С. 72.

второй закон термодинамики, определяющий условия, при которых возможно преобразование максимальной части тепла в работу. После определенного периода, необходимого для дискуссий и освоения, и этот закон занял бы свое место в науке. На этом должно было бы в основном завершиться создание фундамента “королевы наук” — термодинамики.

Однако в действительности все сложилось иначе: сначала был открыт второй закон термодинамики, а позже него — первый. Но этим парадоксы не ограничились. Работу, которой с избытком хватило бы на двух первооткрывателей, выполнил один человек — Сади Карно. И сделал ее за поразительно короткий срок, отведенный ему судьбой, — с начала 20-х годов по 1832 г.

Глава 3

“Размышления о движущей силе огня...”. Идеи, открытия, заблуждения, предвидения (1824 г.)

Постановка задачи. Оценка книги С. Карно основоположниками термодинамики

Небольшая по объему — 118 страниц текста форматом 1/8 и пять рисунков на одном листе — книга С. Карно содержит множество совершенно новых для своего времени (сохранивших значение и сейчас) открытий и предвидений. Хотя в ней сосредоточено не все, что он сделал для науки: основополагающие положения, относящиеся главным образом к первому закону термодинамики, выработанные им позже, содержатся в опубликованных после его смерти записках ¹⁾. Но даже если ограничиться содержанием этой небольшой книжки, при самой жесткой его оценке с позиций XX века, автор “Размышлений о движущей силе огня...” безоговорочно должен быть зачислен в круг самых крупных научных деятелей, классиков науки. Содержание его труда далеко выходит за пределы теории тепловых двигателей: С. Карно одинаково велик и как физик, и как инженер. Неудивительно, что в научном мире до сих пор идут споры о том, к какому “ведомству” его отнести.

Если же ограничить оценку сделанного Карно чисто термодинамической стороной дела, то в обобщенном виде ее сформулировал П. Тэт ²⁾: “Две великие заслуги Карно состоят в том, что он, во-первых, поставил термодинамику на самостоятельное физическое и опытное основание; во-вторых, дал нам по отношению к этой области совершенно новый в математической физике способ рассуждения, который

¹⁾ Их история и анализ содержания даются в следующей, четвертой главе книги.

²⁾ Тэт (Тэйт) Петер (1831–1901) — шотландский физик и математик, профессор Эдинбургского университета. Сделал существенный вклад в развитие науки об энергии. Большую роль в популяризации основ термодинамики сыграла его книга “Теплота” (русский перевод: СПб.: 1888).

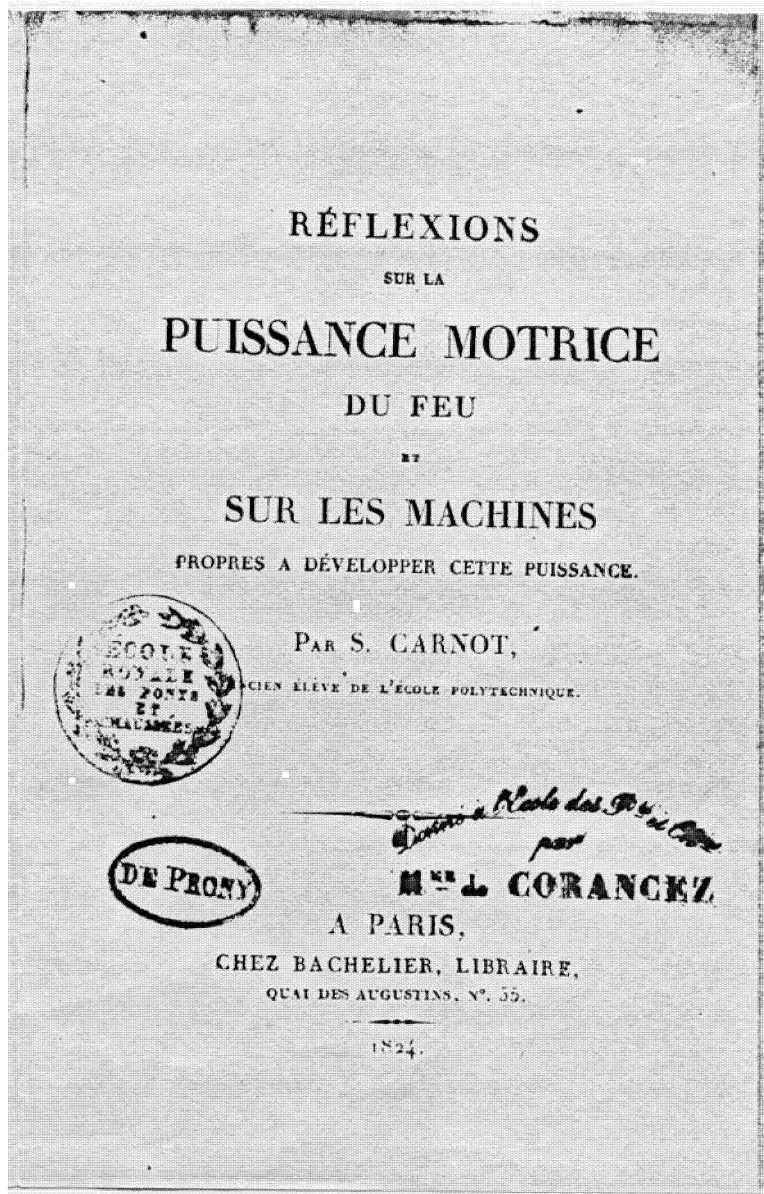


Рис. 11. Обложка “Размышлений о движущей силе огня...” издания 1824 г. (внизу слева печать Прони, члена Института Франции, которому принадлежал этот экземпляр)

оказался не только в руках Карно, но и в руках многих его последователей столь же плодотворным в новых открытиях, как сама идея о сохранении энергии”.

Что касается общего значения книги С. Карно, то наиболее краткую и вместе с тем выразительную характеристику дал ей У. Томсон (лорд Кельвин) — крупнейший физик и организатор науки, широко эрудированный во многих ее областях. Он назвал ее “самым большим достижением науки XIX столетия”. Если вспомнить, что в этом веке наука дала человечеству, то станет ясно, сколь высоко ставил Кельвин заслуги Карно.

Чем же заслужила эта небольшая книжка, автору которой было всего 28 лет, эти и многие другие столь же высокие оценки? Для ответа на этот вопрос необходимо проанализировать ее содержание, опираясь как непосредственно на текст оригинала, так и на информацию о состоянии связанных с ее тематикой направлений науки и техники в конце первой четверти XIX века. Кроме того, необходимо проследить, в какой степени оправдались идеи и прогнозы С. Карно в дальнейшем, вплоть до нашего времени.

Естественно, что такой анализ в пределах, определенных характером и объемом научно-биографической книги, не может быть всеобъемлющим и детальным, но все же он должен охватить все основные положения этой многоплановой работы.

Книга Карно не имеет деления на главы или разделы; тем не менее ее структура просматривается достаточно четко. Для удобства разбора ее содержания целесообразно последовательно придерживаться этой структуры, выделяя основные направления каждого из составляющих ее “блоков”.

Первый из них, вводный, можно назвать “постановка задачи”. Начинается он с характеристики роли тепловых машин и прогноза возможностей их развития. Это сделано настолько выразительно (и притом поэтично), что обойтись без прямого цитирования некоторых отрывков просто невозможно.

“Никто не сомневается, что теплота может быть причиной движения, что она даже обладает большой двигательной силой: паровые машины, ныне столь распространенные, являются этому очевидным доказательством.

Теплоте должны быть приписаны те колоссальные движения на земной поверхности, которые поражают наш взгляд: она вызывает движение атмосферы, поднятие облаков, падение дождя и других осадков, заставляет течь потоки воды на поверхности земного шара, незначительную часть которых человек сумел применить в свою пользу; наконец, землетрясения, вулканические извержения также имеют причиной теплоту.

Из этих огромных резервуаров мы можем черпать движущую силу, нужную для наших потребностей; природа, повсюду предоставляя горючий материал, дала нам возможность всегда и везде получать теплоту и сопровождающую ее движущую силу. Развивать эту силу и приспособлять ее для наших нужд — такова цель тепловых машин.

Изучение этих машин чрезвычайно интересно, так как их значение весьма велико, и их распространение растет с каждым днем. По-видимому, им суждено сделать большой переворот в цивилизованном мире. Тепловая машина уже обслуживает наши шахты, двигает наши корабли, углубляет гавани и реки, кует железо, обрабатывает дерево, мелет зерно, тклет и прядет наши ткани, переносит самые тяжелые грузы и т. д. Со временем, должно быть, она станет универсальным двигателем, который получит преимущество над силой животных, падающей воды и потоков воздуха. Перед первыми двигателями она имеет то преимущество, что экономнее их, перед двумя следующими — неограниченное преимущество, что может работать всегда и везде и никогда не прерывать своей работы.

Если когда-нибудь улучшения тепловой машины пойдут настолько далеко, что сделают дешевой ее установку и использование, то она соединит в себе все желательные качества и будет играть в промышленности такую роль, всю величину которой трудно переоценить.”¹⁾

“Надежное плавание паровых кораблей можно рассматривать как совершенно новое искусство, обязанное тепловой машине. Тепловая машина позволила установить правильное и быстрое сообщение через морские проливы и по большим рекам Старого и Нового Света. Она позволила пройти через дикие страны, куда еще недавно можно было едва проникнуть, позволила принести плоды цивилизации в такие точки земного шара, где их иначе пришлось бы ждать еще годы. 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” (с. 17).

Для этих отрывков характерно прежде всего сделанное на заре теплоэнергетики предвидение колоссальной роли тепловой машины как универсального двигателя в будущем. Важно и то, что Карно пишет не только о паровой машине (ее великое будущее предсказывали в это время и другие, в том числе Л. Карно), а о тепловой машине вообще, рассматривая тем самым паровой двигатель лишь как один из ее видов.

После этого Карно обращается к истории теплового двигателя, посвящая ей два абзаца. В них он подчеркивает важную мысль, которая в полной мере была осознана в более позднее время, когда сформировалась общая теория инженерного искусства и ее приложения в области теплоэнергетики. *“Тепловая машина, как и большинство человеческих изобретений, родилась из почти бесформенных попыток, приписываемых различным людям; истинный же автор остается неизвестен. Но не в этих попытках заключается существенная часть открытия, а в последовательных усовершенствованиях, приведших тепловую машину в ее современный вид. Примерно такое же расстояние отделяет первый прибор, развивавший силу расширения пара, от современной*

¹⁾ Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу. // Второе начало термодинамики. М.-Л.: ГТТИ, 1934. С. 16.

машины, какое отделяет первый плот, построенный людьми, от многопалубного корабля.” Карно показывает, что самая существенная и трудная часть пути от идеи до машины относится к той части, которая связана с последовательными усовершенствованиями — инженерными разработками. Здесь он безоговорочно признает заслуги английских инженеров: Севери, Ньюкомена, *“знаменитого Уатта”* и Тревитика. При этом он отмечает, что *“изобретение появляется и особенно развивается там, где в нем имеется наибольшая потребность.”*

После этого вступления автор переходит к центральному вопросу — теории тепловых машин, отмечая, что *“их теория мало подвинута, и попытки их улучшить почти всегда руководствовались случаем.”* Необходимость развития теории паровых машин и до С. Карно понимали многие. Но какова должна быть эта теория? Постановка вопроса о задачах теории тепловых машин у Карно принципиально отличается от разрозненных попыток его предшественников, ограничивавшихся анализом процессов в цилиндре и котле паровой машины.

Во-первых, Карно с самого начала подчеркивает, что он не намерен ограничиваться паровой машиной, а ставит задачу шире: *“Мы различаем здесь паровые машины и тепловые вообще: последние могут употреблять любой агент, например, водяной пар или что-нибудь другое, для развития движущей силы”*¹⁾ (с. 18).

Во-вторых, сама постановка задачи теоретического исследования ставится С. Карно по-новому. Сказать об этом лучше, чем он это сделал сам, едва ли возможно: *“Часто поднимали вопрос: ограничена или бесконечна движущая сила тепла, существует ли определенная граница для возможных улучшений, граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, или, напротив, возможны безграничные улучшения? Также долгое время искали и ищут теперь, не существует ли агентов, предпочтительных водяному пару, для развития движущей силы огня; не представляет ли, например, атмосферный воздух в этом отношении больших преимуществ. Мы ставим себе задачу подвергнуть здесь эти вопросы внимательному рассмотрению.*

Явление получения движения из тепла не было рассмотрено с достаточно общей точки зрения... Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо изучить его независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него ни производилось воздействие.

¹⁾ Отметим сразу, что под термином “движущая сила” Карно подразумевает работу, отдаваемую двигателем (хотя этот термин не использует). Определение движущей силы, полностью совпадающее с понятием “механическая работа”, он совершенно четко дает в специальном примечании.

Машины, не получающие движения от тепла, а имеющие двигателем силу человека или животных, падение воды, поток воздуха и т. д., могут быть изучены до самых мелких деталей посредством теоретической механики. Все случаи предвидены, все возможные движения подведены под общие принципы, прочно установленные и приложимые при всех обстоятельствах. Это — характерное свойство полной теории. Подобная теория, очевидно, отсутствует для тепловых машин. Ее нельзя получить, пока законы физики не будут достаточно расширены и достаточно обобщены, чтобы заранее можно было предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело” (с. 19).

Здесь все настолько классически точно сформулировано, что какие-либо комментарии по существу постановки задачи были бы излишними. Однако следует отметить три обстоятельства, имеющие непосредственное отношение к той постановке задачи, которая была выработана С. Карно.

Первое из них — это явный дух традиций Карно-старшего: стремление к максимальному обобщению и смелому устранению всех побочных деталей (именно так Л. Карно в свое время анализировал механические устройства и гидравлические машины). Второе — то, что задача такого обобщения здесь поднята на новый, существенно более высокий уровень по сравнению с механикой. Разница уровней подчеркивается тем фактом, что у физиков — современников С. Карно не только не возникла мысль о такой постановке, но и не была ими понята, когда он опубликовал работу. Наконец, третье — это инженерная постановка задачи: техника требует решения задачи, физика не может его дать. Нужно, следовательно, продвинуть физику, расширив ее возможности так, чтобы она могла помочь эти задачи решить. И здесь, и в дальнейшем С. Карно ставит задачи именно как инженер, занявшийся физикой, а не как физик, занявшийся техникой ¹⁾.

В следующем “блоке” книги, занимающем центральное положение, С. Карно излагает вначале общие принципы теории получения работы (“движущей силы”) посредством тепла, а затем дает обобщенную модель идеального устройства, предназначенного для этой цели. В таком придуманном им устройстве осуществляется последовательность процессов, впоследствии получившая наименование “цикла Карно”. Прежде чем приступить к разбору этой важнейшей части “Размышлений ...”, следует уделить внимание понятиям и терминам, которыми С. Карно пользуется и здесь, и в дальнейшем изложении.

Некоторые историки науки обвиняют С. Карно в том, что он пользовался “архаическими методами” изложения материала. Например, А. Бирембо выразился так: “...он писал как математик, решивший

¹⁾ О том, что сам С. Карно считал себя инженером, а не физиком, свидетельствует и ответ, данный им А. Фурси — секретарю комиссии, подготавливающей материал для истории Политехнической школы, о его специальности: “конструктор паровых машин”.

пользоваться только римскими цифрами...” «Остался консерватором в области формы, используя слова физиков, например, “движущая сила” вместо “работа”». Те же упреки и в отношении других терминов, в частности “энергия”. Попробуем разобраться в терминах, используемых Карно, и связанных с ними понятиях, для чего разобьем их условно на две группы.

Первая группа — когда Карно применяет понятия, достаточно четко определенные, но использует для их обозначения “слова старых физиков”. Вторую группу составляют фундаментальные понятия, выражаемые двумя терминами: “тепло” (*chaleur*) и “теплород” (*calorique*). Их содержание требует специального обсуждения (причем не только предварительного, но и в дальнейшем по ходу анализа текста книги С. Карно).

Итак, первая группа терминов — “работа”, “мощность” и “энергия”. Можно ли упрекнуть Карно за то, что он их не использовал?

Понятие, которое мы теперь называем “работа”, было (применительно, разумеется, к механике) хорошо известно и широко использовалось еще в XVIII веке, но в каждой стране называлось по-разному. Например, в русском языке употреблялся термин “действие” (в курсе механики В. Котельникова, выпущенном в 1774 г., дается такое определение: “Действие машины равно тягости, умноженной на пройденный ею путь”.) Вполне строго это понятие сформулировал Л. Карно в своих работах по механике 1783 и 1803 гг. — как “произведение силы на путь и на косинус угла между ними”. Он называл эту величину “момент действия” (*moment d'activat *). Но чаще всего в научной литературе применялся все же термин “движущая сила”. Во Франции как единица для ее измерения вошла в употребление “динама” — величина, равная работе подъема 1 т воды на высоту 1 м (т. е. 1000 кгм). Ее использовал и С. Карно в своем мемуаре.

Что касается самого термина “работа”, то его впервые ввел Ж. Понселе в 1826 г. в своем курсе прикладной механики. Понселе впервые четко разделил понятия “сила” и “работа”, показав, что наиболее правильно понимать под первым только давление, усилие, развиваемое некоторым действующим агентом в данной точке, а под вторым — произведение этой силы на путь. Но это произошло на два года позже выхода в свет работы С. Карно. Поэтому он никак не мог воспользоваться термином “работа” в том виде, который придал ему Понселе¹⁾. Надо, однако, заметить, что Карно не только точно следовал существу этого понятия, но и за два года до Понселе (хотя и придерживался прежней терминологии) пошел дальше, выйдя за пределы механики. Он показал возможность вычисления “движущей силы” (т. е. работы) в новой области, при изменении объема газа.

¹⁾ Кстати говоря, термин “работа” привился далеко не сразу; его быстро оценил лишь Г. Кориолис. Всеобщее признание пришло позже — на это понадобилось два десятилетия.

Что касается термина “мощность” (*puissance*), который в то время не применялся в современном смысле, то Карно им, естественно, тоже не пользовался. Вообще, в этом понятии классическая термодинамика не нуждается, поскольку время для нее не имеет значения. В тех же случаях, когда речь идет о технике и конкретных машинах, мощность которых надо оценить, Карно пользуется единицей, введенной Уаттом — лошадиной силой (75 кгм/с). Так что и здесь у Карно все правильно.

Понятие “энергия” было введено Т. Юнгом в 1807 г. в чисто механической трактовке. Обобщенное понимание этого понятия как всеобщей меры различных форм движения материи развилось значительно позже, во второй половине XIX века, когда первый закон термодинамики уже окончательно утвердился. Только в это время (и то не сразу) термин “энергия” стал соответствовать своему античному прототипу (*ενεργια* у Аристотеля) — некому всеобщему движущему началу. Естественно поэтому, что претензии к С. Карно, как и к его современникам, что они не пользовались термином “энергия”, кажутся по меньшей мере странными.

Трактовка того содержания, которое С. Карно вкладывал в широко им используемые термины “тепло” (*chaleur*) и “теплород” (*calorique*), должна занимать одно из центральных мест при анализе его труда.

Во времена Карно “*chaleur*” (теплота) не было термином, а понималось в общем, качественном смысле как некая причина, вызывающая тепловые ощущения. Термин “*calorique*” (теплород), напротив, имел четкий смысл — он обозначал невесомый флюид, тепловую материю, содержащуюся в физических телах и передаваемую от одного тела к другому, количество которой поддавалось строгому измерению. На этом основывалась целая отрасль науки — калориметрия. Для теплорода закон сохранения принимался незыблемым. С. Карно (как и его современники) именно так использует оба эти понятия¹⁾. Везде, где говорится о тепловых явлениях в общем, качественном плане, в частности и о тепле как причине движения, он употребляет слово “*chaleur*”, но там, где речь идет об измеряемых количествах теплоты, относящихся непосредственно к созданию движущей силы, использует слово “*calorique*”.

В трактовке слова “*calorique*” — “теплород” у Карно имеется одна существенная и далеко ведущая особенность, отсутствующая у других современных ему авторов (она может быть выявлена только после анализа той части работы Карно, к которой мы переходим).

¹⁾ В примечании он пишет, что употребляет оба выражения “количество тепла” и “количество теплорода” без различия.

Идеальная тепловая машина

Основная мысль Карно здесь сводится к тому, что получение работы¹⁾ в любой тепловой машине неизбежно связано с переходом теплорода от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой через посредство промежуточного вещества.

Карно писал: *“В самом деле, что происходит в паровой машине, находящейся в движении? Теплород, полученный в топке благодаря горению, проходит через 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 сжигается. 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...”*

“...Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода (calorique), а его переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия — равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, как горение, или что-нибудь иное. Мы увидим, что этот принцип приложим ко всем машинам, приводимым в движение теплотой... Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановления равновесия теплорода, возможно получение движущей силы” (с. 24).

Такова исходная концепция Карно — сжиганием топлива или другим путем некоторое количество теплорода поднимается на более высокий температурный уровень (*“нарушается равновесие теплорода”*), а затем, в процессе восстановления равновесия, он может производить работу посредством какого-либо рабочего тела, например воды. Это рабочее тело может быть любым. *“Водяной пар есть одно из средств обнаружить эту силу, но не единственное; все тела природы могут быть применены для этого; все тела природы способны к изменению объема, к сжатию и расширению при действии тепла и холода; все способны при изменении своего объема побеждать некоторые сопротивления и, таким образом, развивать движущую силу.”*

Окончательная формулировка, выделенная ниже курсивом (она впоследствии получала название “постулата Карно” или “принципа Карно”), такова: *“Повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы. Обратное, повсюду, где можно затратить эту силу, возможно образовать разность температур, нарушить равновесие теплорода.”*

¹⁾ Здесь и в дальнейшем изложении (за исключением прямых цитат) вместо термина “движущая сила” будет использоваться современный термин “работа”, имеющий тот же смысл.

Карно использует паровую машину только как некий трамплин, отталкиваясь от которого сразу переходит к обобщению, к абстрактной (в высоком смысле этого слова — как высшей ступени обобщения) модели, охватывающей все возможные варианты теплового способа получения работы. В основу кладется наличие разности температур. Из этой концепции сразу же следуют два важнейших вывода (пока в качественном плане).

Первый — о принципиальной возможности использовать любое рабочее тело — хотя и не был никем сформулирован раньше, в общем виде все же опирался на некоторый опыт с двигателями как внешнего сгорания, работавшими на воздухе ¹⁾, так и внутреннего сгорания (работы Ньепсов).

Второй — о возможности обратить процесс, затратив работу, поднять теплород на более высокий температурный уровень — был совершенно новым. Здесь Карно, по-видимому, имел в виду возможность образовать разность температур посредством сжатия. Далее, уже на базе разработанного им цикла, применяя его обращение, он предсказал появление теплового насоса (а также холодильной установки) — устройств, идея реализации которых и первые образцы появились лишь несколько десятилетий спустя. Это первое (но не единственное) из тех гениальных предвидений Карно, которые он “мимоходом” делает в своей книге.

Далее Карно излагает следующий “блок” новых идей, в котором переходит от общих положений к обоснованию модели идеального процесса получения работы в тепловой машине. В конечном счете такая модель должна позволять перейти к количественному анализу. Основной для создания этой модели служит положение о том, что для каждого интервала температур существует некоторое предельное количество работы (максимум “движущей силы”), которое можно получить при использовании данного количества теплорода. Это утверждение С. Карно обосновывает невозможность создания *perpetuum mobile* — вечного двигателя. Рассматривая передачу некоторого количества теплорода от тела *A* (более горячего) к телу *B* (более холодному) с получением работы и передачу того же его количества от тела *B* к телу *A* с затратой работы, он пишет: *“...если ... нет никаких потерь ни в движущей силе, ни в теплороде, то количество движущей силы, произведенной в первом случае, будет равно тому, которое было затрачено во втором, и количество теплорода, перешедшее в первом случае от тела A к телу B, будет равно количеству возвратившегося во втором случае*

¹⁾ С. Карно не знал ни содержания работ шотландца Стирлинга по воздушному двигателю, ни даже его фамилии, однако сам факт проведения этих исследований был ему известен. Он писал об этом в одной из сносок так: *“Говорят, недавно в Англии были сделаны удачные попытки развить движущую силу действием тепла на атмосферный воздух. Мы совершенно не знаем, в чем заключались эти попытки и были ли они произведены на самом деле.”* (с. 59).

от тела В к телу А; можно делать бесконечное число операций этого рода...” (с. 23).

“Значит, если бы существовали средства более выгодные для использования тепла (*chaleur*), чем те, которыми мы пользовались, т. е. если бы было возможно каким-либо методом получить от теплорода большее количество движущей силы, чем мы получили первой серией наших операций, то стоило бы только употребить часть этой силы для возвращения указанным способом теплорода от тела В к телу А, от охладителя к нагревателю, как первоначальное состояние было бы восстановлено; можно было бы возобновить подобную операцию и действовать так и далее; это было бы не только вечным движением, но и беспредельным созданием движущей силы без затраты теплорода или каких-либо других агентов.

Такое создание совершенно противоречит общепринятым идеям, законам механики и здоровой физики” (с. 24).

Таким образом, С. Карно делает здесь новый существенный шаг, распространяя положение о невозможности осуществления *perpetuum mobile* на немеханические виды движения. Предвидя возможные возражения, он добавляет в сноске: “Могут здесь спросить: если доказана невозможность *perpetuum mobile* для чисто механических действий, то имеет ли это место при употреблении тепла и электричества; но разве возможно для явления тепла и электричества придумать иную причину, кроме какого-либо движения тел, и разве эти движения не должны подчиняться законам механики?” Кроме этих общих соображений о единстве законов, управляющих разными формами движения материи, он апеллирует к опыту: “Кроме того, разве неизвестно а *posteriori*, что все попытки каким-то ни было методами осуществить *perpetuum mobile* оказались бесплодными, что никогда не удастся получить настоящий *perpetuum mobile*, т. е. движение, которое продолжается вечно без изменения употребляемых тел?” (с. 24).

Поскольку Карно, как видно из этих отрывков, исключал возможность создания *perpetuum mobile* вообще, он должен был бы при анализе тепловой машины найти и показать, что же служит эквивалентом произведенной работы. Но в то время он, как и другие его современники, еще не вырвался из плена вещественной теории теплоты. Связать полученную работу с убылью теплорода было невозможно — его количество не могло уменьшаться¹⁾. Возможный пересмотр этого

¹⁾ Правда, он все же ощущал, что тут не все в порядке. Об этом он упоминает дважды. В первый раз он пишет осторожно: “Впрочем, заметим мимоходом, основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории.”. Возвращаясь к этому вопросу вторично, он пишет более определенно, что “опирается на признаваемую в настоящее время теорию тепла, которая, нужно сознаться, не представляется нам непоколебимой твердостью” (с. 29).

положения он отложил на будущее, пока опираясь на существующую теорию ¹⁾.

Выход он нашел в гидравлической аналогии: в представлении о падении неизменного количества теплорода (аналогично воде) с некоего верхнего уровня на нижний; при этом и производится работа. Аналогом высоты в этом случае служит температура. Говоря об обосновании гидравлической аналогии, Карно писал: “...можно с достаточным основанием сравнить движущую силу тепла с силой падающей воды: обе имеют максимум, который нельзя превзойти, какая ни была бы в одном случае машина для использования действия воды, а в другом — вещество, употребленное для развития движущей силы тепла” (с. 26).

Такое представление, несмотря на его простоту, оказалось чрезвычайно плодотворным. Оно позволило Карно обосновать модель идеальной тепловой машины и ввести принципиально новый метод исследования, а также понятия, которые затем легли в основание новой науки — термодинамики. Модель Карно выдержала испытание временем — пережила падение теории теплорода, оторвалась от гидравлической аналогии, сохранилась в классической термодинамике, живет до сих пор ²⁾ и нет никаких оснований считать, что она не будет жить и дальше.

Модель идеальной тепловой машины, предложенной Карно, показана на рис. 12, взятом из его книги. Ее устройство и процессы, в ней протекающие, описаны с классической ясностью. Поскольку это описание — основа всего дальнейшего, приведем его полностью.

“Представим себе упругую газообразную среду например атмосферный воздух, заключенную в цилиндрический сосуд $abtl$, закрытый подвижной диафрагмой или поршнем cd ; кроме того, представим два тела A и B , поддерживаемые при постоянной для каждого температуре, причем A при более высокой, чем B ; затем вообразим следующий ряд операций.

1. Тело A приводится в тепловой контакт с воздухом, заключенным в сосуде $abtl$ через

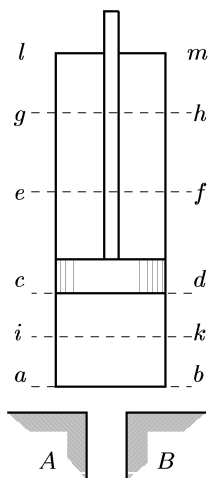


Рис. 12. Иллюстрация из книги Карно с изображением системы, позволяющей осуществить предложенный им цикл в цилиндре с поршнем. Рабочее тело — воздух

¹⁾ Об этом он написал дальше тоже осторожно, но достаточно ясно: “Решить вопрос могут только новые опыты. Пока мы будем заниматься приложением высказанных выше теоретических идей, считая их точными” (с. 51).

²⁾ Только понятие “калорик” заменилось понятием “энтропия” (но об этом позже).

стенку сосуда, которая легко пропускает теплород. Благодаря этому соприкосновению воздух будет иметь температуру тела A ; cd — положение поршня к этому моменту.

2. Поршень под давлением расширяющегося воздуха непрерывно поднимается и принимает положение ef . Все это время существует тепловой контакт между телом A и воздухом, который таким образом поддерживается при постоянной температуре во все время расширения. Тело A дает теплород, необходимый для поддержания постоянной температуры.

3. Тело A удалено, и воздух в цилиндре больше не снабжается теплородом; поршень же продолжает свое движение и переходит из положения ef в положение ab . При этом воздух расширяется, не получая теплорода, и его температура понижается. Предположим, что она снижается до тех пор, пока не достигнет температуры тела B ; в этот момент поршень останавливается и занимает положение gh .

4. Воздух через стенку сосуда приведен в контакт 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 и отдает свой теплород.

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

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

7. Период, описанный в п. 3, повторяется, затем следуют 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 и т. д.” (с. 28).

Это не только первое описание знаменитого цикла Карно, но и вообще первое описание идеализированного цикла тепловой машины. В сочетании с теми комментариями, которыми Карно его сопроводил, оно содержит ряд совершенно новых фундаментальных идей и понятий, впервые введенных им в науку ¹⁾.

¹⁾ Подчеркнем сразу же, что здесь речь идет именно о новых идеях и понятиях, а не о терминах, к ним относящихся, которые появились значительно позже. Известно, что любое новое понятие должно неизбежно пройти некоторую “обкатку”, доработку до того, как будет окончательно сформулирован в полной мере соответствующий термин. С. Карно понимал это лучше, чем многие его будущие комментаторы, когда писал: “Так как предмет, о котором здесь идет речь, совершенно нов, мы вынуждены употреблять выражения, еще не принятые и, может быть, не отражающие всей желаемой ясности” (с. 26). Термин “термодинамический” был впервые введен У. Томсоном в 1849 г. (т. е. через 25 лет после выхода книги С. Карно). Оба составляющие этого слова вначале писались через дефис

Прежде всего это понятие, которое теперь называется “*термодинамический цикл*” (или, что то же самое, “*круговой процесс*”).

Для определения максимальной величины “движущей силы огня” нужно было построить модель так, чтобы вся она перешла в работу. Необходимое условие для этого — не оставлять в промежуточной системе, осуществляющей этот процесс, никаких остаточных изменений. Действительно, если рабочее тело будет поступать в машину в одном состоянии, а уходить будет из нее в другом, то нет никакой уверенности в том, что она либо унесет с собой часть движущей силы тепла, либо внесет ее дополнительно. Следовательно, единственный способ полностью исключить такую возможность — заставить рабочее тело каждый раз после совершения всех необходимых процессов возвращаться в исходное состояние. Именно такой круговой процесс и совершает рабочее тело в описанной выше модели С. Карно. “*Воздух, которым мы пользуемся для получения движущей силы, приводится в конце каждого цикла операций точно к прежнему состоянию...*” (с. 29).

Метод циклов, введенный С. Карно в науку, послужил в дальнейшем для вывода многих термодинамических закономерностей. Первым, кто после Карно использовал его для получения новых научных результатов, был Э. Клапейрон, который вывел таким путем важную зависимость, известную под названием формулы Клапейрона—Клаузиуса. В дальнейшем метод циклов долгие годы оставался единственным и чрезвычайно плодотворным способом анализа не только в теоретической термодинамике, но и при разработке и усовершенствовании теплосиловых и холодильных установок; только с конца XIX и XX века наряду с ним стал использоваться метод потенциалов, разработанный Дж. Гиббсом.

Второе принципиальное понятие, впервые сформулированное С. Карно, — потеря движущей силы (т.е. работы) в результате неравновесного термического взаимодействия.

Относительно передачи тепла от одного тела к другому при наличии разности температур, но без получения работы Карно замечал: “*Всякое восстановление равновесия теплорода, происходящее без образования этой (движущей — В.Б.) силы, можно считать за настоящую потерю*”. Далее он поясняет: “*Эта потеря встречается во всех паровых машинах: в самом деле, вода, вводимая в котел, всегда холоднее находящейся там воды; между ними происходит бесполезное восстановление равновесия теплорода. Легко a posteriori убедиться, что это выравнивание действительно представляет потерю в движущей силе, если принять во внимание, что воду, подаваемую в котел, можно сперва согреть, употребляя ее как воду для конденсации пара в маленькой побочной машине, питаемой паром из того же котла,*

(термо-динамический). Слияние их в одно слово “термодинамика”, обозначающее новую науку, произошло уже впоследствии, в 50-х годах (1854 г., Ранкин).

что и большая, но имеющая в холодильнике температуру, среднюю между температурой котла и главного холодильника”¹⁾ (с. 25).

Вывод однозначен: любые непосредственные тепловые контакты, приводящие к переносу теплорода между телами с разными температурами, в теплосиловой машине *“должны быть уменьшены насколько возможно. Конечно, они не могут быть исключены совершенно; но по крайней мере следует стремиться к тому, чтобы соприкасающиеся тела мало различались по температуре”* (с. 25).

Здесь Карно приводит, если использовать современную терминологию, вполне корректный качественный анализ потерь эксергии (работоспособности) при теплопередаче с конечной разностью температур и указывает направление, в котором надо двигаться, чтобы эти потери минимизировать. Такая “энергетическая” точка зрения на перенос тепла была для того времени настолько нова, что полное ее непонимание не должно вызывать удивления. Перенос теплоты рассматривался только в калориметрическом плане или в процессах, связанных с теплопроводностью, как у Фурье; вещественная теория теплоты здесь прекрасно работала. Мысль о том, что процесс теплопередачи неизбежно связан с потерей работы, снижением качества тепла, никому не приходила в голову: никаких следов такого подхода к теплопередаче ни у предшественников, ни у современников Карно обнаружить не удалось.

Поскольку Карно поставил своей целью создать модель идеальной машины для использования движущей силы тепла, перед ним возникла задача исключить в ней потерю работы при теплопередаче. Он справился и с этой трудностью, введя в науку “между делом” еще одно фундаментальное понятие — *идеальное термическое взаимодействие*, из которого неизбежно следовало распространение понятия обратимости на тепловые явления. С. Карно пошел здесь тем же путем, что и его отец, когда тот разрабатывал идеальную модель машины в механике (“О машинах вообще”). С. Карно тоже свел разность потенциалов при взаимодействии до бесконечно малой величины; он сделал новый решающий шаг, перенес метод в новую область и использовав в качестве потенциала температуру.

“Чтобы обусловить переход теплорода от одного тела к другому, первое из них должно иметь более высокую температуру; но разность температур можно взять сколь угодно малой; в теории ее можно считать за нуль без того, чтобы рассуждения потеряли в точности” (с. 25). Именно такой подход, основанный на бесконечно малой разности температур, Карно использовал при построении цикла для подвода теплорода к рабочему телу в процессе 2 и отвода его в процессе 4 (рис. 12). Переход же рабочего тела от T_A к T_B и обратно от T_B к T_A совершается соответственно посредством процессов расширения

¹⁾ По существу, здесь предложена совершенно новая для того времени идея предварительного регенеративного подогрева питательной воды, введенная в практику значительно позже. Это один из многих примеров изобретений, сделанных в работе Карно “мимоходом”.

и сжатия, не связанных с подводом или отводом теплорода. Следовательно, весь круговой процесс происходит без потерь движущей силы — работы; условие, чтобы разность температур при переходе теплорода везде оставалась бесконечно малой, соблюдается. Потери работы от переноса теплорода при конечной разности температур таким путем исключаются. *“Нигде не будет соприкосновения между телами с заметной разностью температур”* (с. 25).

Поэтому Карно с полным правом пишет об обратимости цикла — возможности провести его в обратном направлении, перенеся то же количество теплорода с нижнего температурного уровня на верхний, вернувшись к исходному состоянию. После описания своего цикла он добавляет: *“Очевидно, можно продолжать ряд операций, обратных описанным выше: достаточно каждый раз становиться в прежнее условия и для каждого периода выполнять движение разрежения вместо движения сжатия, и наоборот.”*

Результатом первых операций было получение определенного количества движущей силы и перенос теплорода от тела А к телу В; результатом обратных операций будет затрата полученной движущей силы и возвращение теплорода от тела В к телу А; обе операции уничтожают друг друга или, так сказать, друг друга нейтрализуют.”

Можно ли яснее и проще сказать об обратимости циклов?

Таким образом, С. Карно ввел в науку обобщенное понятие об обратимых тепловых процессах, проходящих без “потери движущей силы”, т.е. без диссипации энергии. Оно в принципе отличалось от круга понятий, которыми оперировал Фурье, рассматривая полностью диссипативные процессы, в которых работа не производилась и не затрачивалась ¹⁾.

Рассмотрение задачи с помощью идеального цикла, основанного на гидравлической аналогии, и новых понятий, с ними связанных, дало С. Карно возможность сформулировать в конце общетеоретической части работы принципиально важный вывод о независимости максимальной работы цикла от природы рабочего тела и о том, что она определяется только температурами теплоотдатчика и теплоприемника. В нем, по существу, содержится в концентрированном виде основа всех будущих работ, которые позволили окончательно сформулировать второе начало термодинамики. Известный в дальнейшем как постулат Карно, он в авторской редакции формулируется так: *“Движущая сила тепла (chaleur) не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми в конечном счете производится перенос теплорода (calorique)”* (с. 30).

¹⁾ Принципиальную разницу между этими двумя подходами хорошо выразил Трусделл. Первый подход (Карно) он охарактеризовал словами “Dissipationless Work” — “работа без диссипации”, а второй “Workless Dissipation” — “диссипация без работы” (см. литературу в конце книги).

Здесь, как и в других местах, где говорится о переносе теплорода, Карно с неизменным постоянством употребляет термин “calorique”, но нигде не использует “chaleur”. Хотя он оговорил в примечании, что при употреблении этих терминов не делает различия, это несомненно не так. Скорее всего, здесь проявилась осторожность, обусловленная тем, что разница между понятиями, связанными с этими терминами, была ему до конца не ясна, и он отложил ее анализ на будущее. Такое явно выраженное стремление разделить термины, связанные с тепловыми явлениями, никак не могло быть случайным и поэтому привлекло внимание исследователей, занимавшихся историей термодинамики и работой С. Карно.

Первым был Оствальд, натолкнувшийся на это терминологическое различие при переводе книги Карно на немецкий язык и отметивший его в своих примечаниях; затем обсуждением этого вопроса занялись многие другие исследователи. Бросалось в глаза удивительное сходство понятия, соответствующего термину “calorique”, со свойствами позже введенного Клаузиусом понятия “энтропия”: если в книге вместо термина “calorique” везде поставить “энтропия”, все положения останутся незыблемыми. Поскольку Карно в теоретической части работы оперирует только предельно идеализированными, обратимыми процессами, энтропия, подводимая к рабочему телу, равна той, которая отдается теплоотдатчикам на верхнем уровне. Она же переносится на нижний температурный уровень и, не меняясь, передается теплоприемнику. Рабочее тело, завершая цикл, в любой точке имеет ту же энтропию (содержит то же количество calorique), которую имело, начиная изменение состояния от этой точки.

Такое совпадение свойств понятий “calorique” и “энтропия” дало основание утверждать, как это делают некоторые авторы (например, V. C. La Mer), что Карно еще задолго до Клаузиуса ввел в науку понятие, соответствующее энтропии (применительно к обратимым процессам), или, другими словами, открыл закон постоянства энтропии в обратимых процессах. С такой модернизацией работы Карно едва ли можно согласиться. Вместе с тем не подлежит сомнению, что Карно явно понимал необходимость расчленения единого понятия теплоты на два разных по свойствам понятия. Одно из них — “chaleur”¹⁾ — причина движущей силы, работы; второе — “calorique” — некий тепловой субстрат, неизменный по величине (обладающий свойством сохранения), могущий перемещаться с верхнего уровня температуры на нижний.

Именно этим разделением объясняется в конечном счете самая характерная и вместе с тем удивительная особенность работы С. Карно. Он получил вполне правильные совершенно новые результаты, несмотря на то, что основное исходное положение, принятое и последовательно

¹⁾ Некоторая неопределенность термина “chaleur” заставила Карно все же остановиться в заголовке книги на слове “feu” — “огонь” (в рукописи ясно видна эта замена — слово “chaleur” написано, а потом зачеркнуто).

проводимое им от начала до конца — “принцип сохранения теплоты” — неверно; более того, основные выводы, к которым он пришел, полностью сохранились, несмотря на радикальный пересмотр принципиальных положений, относящихся к теории тепла и замену “принципа сохранения тепла” на “принцип преобразования”.

Карно, как это видно из его примечаний, предвидел такую возможность. Разделяя понятия “chaleur” и “calorique”, он обеспечил себе определенную свободу для дальнейшего развития и пересмотра понятия теплоты (“chaleur”), оставляя неизменным понятие “calorique”, лежащее в основе его теории и гидравлической аналогии.

Как показывают его неопубликованные заметки (разбор которых сделан в следующей главе), он использовал эту свободу в полной мере, установив механический эквивалент теплоты и сняв тем самым окончательно основное противоречие, к которому приводила вещественная теория теплоты. Тем самым он открыл термину “chaleur” — “теплота” — путь в науку. Разработка же понятия “calorique” и превращения его в “энтропию” пали на долю Клаузиуса. Но все это дело будущего. Пока же Карно опирался на вещественную теорию тепла. Создал обобщенную модель идеальной тепловой машины и установив с помощью введенных им общих понятий фундаментальные законы, определяющие ее действие, С. Карно не считал возможным этим ограничиться. Он понимал необходимость перехода от общих качественных положений к нахождению количественных характеристик, подтверждающих теорию. При решении этой задачи он мог опираться только на тот задел, который могла дать современная ему наука: известные тогда газовые законы и экспериментальные данные по некоторым теплофизическим свойствам немногочисленных веществ, пригодных для использования в качестве рабочих тел двигателя.

Теплофизические расчеты С. Карно и определение им численных значений “движущей силы тепла”

Постановка задачи в той части “Размышлений...”, которая посвящена количественному анализу “движущей силы тепла” в различных условиях, в том числе при разных рабочих телах, сформулирована С. Карно коротко, в двух фразах. *“Разные методы развития движущей силы тепла могут отличаться или применением разных веществ, или употреблением одного и того же вещества при двух различных состояниях, например, одного и того же газа при разных плотностях.*

Это, естественно, ведет нас к интересным исследованиям газообразных текучих веществ — исследованиям, которые приведут к новым результатам относительно движущей силы тепла и дадут нам средства проверить основное положение” (с. 30). Под “основным положением” здесь понимается независимость “движущей силы тепла” от используемых агентов при заданных температурах теплоотдатчика и теплоприемника. Решение поставленной таким образом задачи (рассчитать работу цикла Карно между двумя заданными температурами)

для разных рабочих тел в наше время, когда мы располагаем термодинамическими таблицами или диаграммами, — задача элементарная. Однако в то время, когда Карно к ней приступил, сама ее постановка была необычной, не говоря уж о решении. Оно было связано с двумя почти непреодолимыми трудностями.

Первая из них — это скудость имевшихся в распоряжении исследователей экспериментальных данных о термических и калорических свойствах газов и водяного пара. Рассчитывать на их основе сколь-нибудь точно характеристики циклов, нужные для подтверждения постулата Карно, — задача почти невыполнимая.

Вторая трудность, носящая фундаментальный характер, — это необходимость опираться на вещественную теорию тепла, из которой следовало положение о сохранении теплоты во всех процессах и их сочетаниях. Если в общетеоретической части работы Карно обошел эту трудность, разделив понятия “chaleur” и “calorique”, здесь это помочь не могло. Поэтому подсчет работы цикла, равной на самом деле разности количеств подведенного и отведенного тепла, в принципе не мог быть корректно произведен на основе теории, по которой эта разность всегда равна нулю.

Карно знал о первой трудности и догадывался (но еще не осознал до конца) о второй. Тем не менее он отважился на количественное исследование и, как это ни парадоксально, в значительной степени его провел. Какое значение он придавал этой части работы, видно из того, что она занимает в его труде больший объем, чем первая, общетеоретическая часть, в которой обоснованы и сформулированы основные фундаментальные положения.

Вследствие упомянутых причин ему не удалось, как он хотел, неопровержимо доказать на примерах верность выведенных им положений. Более того, в ходе выводов он не избежал и некоторых ошибок. Однако в процессе этой работы он получил новые важные результаты, опередив своих современников и в этой области.

Карно начинает этот раздел с некоторых соображений и вычислений, относящихся к свойствам газов, чтобы заготовить минимум положений и данных, необходимых для дальнейших шагов. Напомним, что процессы отвода и подвода тепла по изотермам составляют основу цикла Карно. Поэтому он постулирует, опираясь на законы Мариотта, Гей-Люссака и Дальтона, важное положение: *“Когда газ переходит от определенных объема и давления к другим, также определенным объему и давлению, не меняя температуры, то количество теплорода, отданного или поглощенного, — одно и то же независимо от природы газа”* (с. 31). Другими словами, количество тепла, подводимого к любому газу при изотермическом изменении объема в одно и то же число раз, должно быть при данной температуре одним и тем же. Затем Карно устанавливает связь между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме газа: *“разность между теплоемкостью при постоянном давлении и теплоемкостью при постоянном объеме одна и та же для всех газов”* (с. 33), т. е. $c_p - c_v = \text{const}$.

Научные редакторы “разводят руками”, комментируя это и другие подобные места его работы. Например, В. Р. Бурсиан и Ю. А. Крутков в примечаниях к русскому переводу книги Карно пишут так (примечание 18): “Эти рассуждения Карно, как основанные на вещественной теории тепла, с современной точки зрения ошибочны, хотя и приводят к верному результату относительно постоянства разности двух теплоемкостей”. И далее (примечание 24): “Хотя предыдущие рассуждения, как указано в примечании 18, основаны на ошибочной вещественной теории тепла, все же и в этой, несколько иной формулировке высказанная теорема верна”.

Далее, при комментировании соображений, относящихся к получению работы, опять повторяются те же парадоксы. Примечание 28: “Здесь снова Карно в своих рассуждениях явно пользуется вещественной теорией тепла. Качественно правильный результат, получающийся отсюда, в настоящее время выводится на основании совершенно других соображений”. Примечание 29: “Заключение это верно, несмотря на неверные предпосылки...”

Этот “качественно верный результат” столь же важен, как и утверждение С. Карно о том, что *“падение теплорода производит больше движущей силы при низких градусах, чем при более высоких”*. Если к этому присовокупить пояснения о существовании некоторой функции температуры $F(t)$, которая могла бы дать возможность *“определить движущую силу для любого падения теплорода”*, и мысль о том, что эта функция основана на постоянстве теплоемкости c_v (идеальный газ!), станет очевидно, что здесь заложен фундамент для вывода будущей формулы коэффициента Карно $(T_1 - T_2)/T_1$ — краеугольного камня термодинамики.

Как же Карно смог получить такой “пакет” фундаментальных открытий, исходя из неверных предпосылок и пользуясь неправильной теорией? Независимо от частных задач, которые решались Карно “по дороге”, основная конечная цель этой части работы состояла в том, чтобы *“определить количество тепла, отдаваемого или поглощаемого упругой жидкостью при изменении объема”* (с. 31) в изотермических условиях. Действительно, поскольку работа при изменении объема легко вычислялась, знание этого количества тепла давало возможность подсчитать и “движущую силу тепла”. Однако, как правильно здесь же констатировал Карно, это количество тепла *“никогда не было измерено непосредственным опытом, который представил бы, без сомнения, большие трудности”*. Оставался один путь — опираясь на известные законы и данные, вывести эту величину путем логических умозаключений. Но материала для этого не хватало. Поэтому, буквально продираясь через возникающие на каждом шагу противоречия, перепрыгивая через разрывы, обусловленные недостатком данных, Карно все же добрался до цели: в результате расчетов он получил, что движущая сила тепла в одинаковых интервалах температур для воздуха, водяного пара и этилового спирта примерно одинакова.

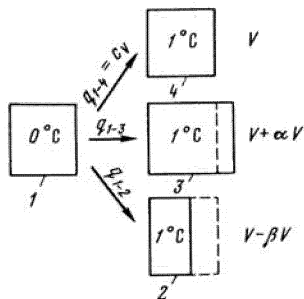


Рис. 13. Схема процессов изменения состояния газа при повышении его температуры на 1°C

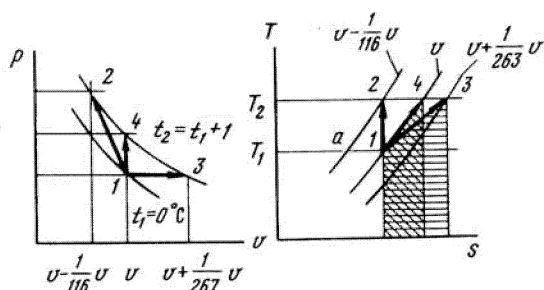


Рис. 14. Изображение процессов изменения состояния при повышении температуры газа на 1°C . Слева — p - v -диаграмма, справа — T - s -диаграмма газа

Подобный разбор этой части исследования Карно едва ли нужен. Однако в ней есть места, представляющие интерес с точки зрения анализа некоторых методических приемов, с помощью которых он обходил почти непреодолимые трудности. Один из таких приемов был им использован при определении связей между теплоемкостью при постоянном давлении (c_p) и постоянном объеме (c_v); два других — при определении “движущей силы” (т. е. работы), получаемой посредством теплосилового цикла.

К тому времени, когда Карно работал над своим мемуаром, уже были известны значения теплоемкости воздуха при постоянном давлении (равном атмосферному), полученные экспериментально Делярошем и Бераром; но данных по теплоемкости при постоянном объеме не существовало. Поэтому Карно придумал некоторую модель (рис. 13), в которой сопоставляет три процесса ¹⁾: адиабатного сжатия (1-2 на рис. 14), изобарного нагревания (1-3 на рис. 14) и изохорного нагревания (1-4 на рис. 14) воздуха; все три в небольшом температурном интервале от 0° до 1°C .

Из эксперимента известно, что в процессе 1-2 объем v воздуха уменьшится на $\beta = 1/116$, т. е. составит $v - \beta v$. При изобарном нагреве в процессе 1-3, по закону Гей-Люссака, объем v возрастет на $\alpha = 1/267$, т. е. составит $v + \alpha v$ ²⁾. Наконец, в последнем случае (процесс 1-4) при нагреве на 1°C в жестком сосуде объем останется неизменным. Температура в конце процесса во всех трех случаях будет одна и та же — 1°C . (Для наглядности все три процесса 1-2, 1-3 и 1-4 показаны на диаграммах p - v и T - s на рис. 14). Далее у Карно из сравнения этих трех процессов следуют важные выводы.

¹⁾ Для удобства изложения мы будем использовать здесь и в дальнейшем некоторые современные термины и обозначения, не отклоняясь, естественно, от хода мыслей Карно.

²⁾ По современным данным $\alpha = 1/273$.

Во-первых, “разность количеств тепла, которыми воздух обладает в обоих случаях (т. е. в состояниях 2 и 3), есть, очевидно, количество, употребленное для его непосредственного нагревания на 1°C ”. Другими словами, поскольку в процессе 1–2 тепло не подводилось, количество тепла, “содержащегося” в сжатом воздухе (состояние 2), то же, что и в исходном состоянии 1.

Во-вторых, “количество тепла, отдаваемое воздухом при уменьшении объема на $1/116$ (т. е. в процессе 1–2), равно тому, которое он возьмет при повышении температуры на 1°C при постоянном объеме” (т. е. в процессе 1–4).

Далее, принимая “количества тепла, поглощаемые воздухом, приблизительно пропорциональными изменениям объемов”, Карно получает зависимость между количествами тепла, затраченными в процессах 2–1–3 (т. е. c_p) и 2–1–4 (т. е. c_v) как $(\beta + \alpha)/\beta$; “это и есть соотношение между емкостями воздуха к теплоте при постоянном давлении и постоянном объеме” (с. 33). Следовательно, $c_p/c_v = (1/116 + 1/267)/(1/116) = 1,43$; если принять условно $c_p = 1$, то $c_v = 0,7$ и их разность будет постоянной величиной для всех газов.

Такими рассуждениями, основанными на модели, показанной на рис. 13, Карно пришел к фундаментальному выводу о связи теплоемкостей при постоянном давлении (c_p) и постоянном объеме (c_v). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что он, рассматривая переход от состояния 2 к состоянию 3, считает затраченное количество тепла пропорциональным отношению $(\beta + \alpha)/\beta$, т. е. связывает его с двумя процессами изменения объемов. Первый из них (1–3) протекает с подводом тепла и поэтому с точки зрения вещественной теории законно должен учитываться при определении c_p . Но второй (1–2) не сопровождается отводом и подводом тепла; следовательно, с точки зрения вещественной теории “содержание тепла” в газе при нем не меняется. Но Карно сделал ход, не имевший для его современников смысла: он “привлек к делу” этот процесс сжатия. Карно принял во внимание (говоря языком современных терминов) изменения внутренней энергии газа вследствие внешней работы при расширении и сжатии, пропорциональные изменениям объемов, и ввел их в свои рассуждения. В какой мере этот шаг был осознанным, сейчас сказать трудно; однако очевидно, что отсюда остается только один шаг к пониманию, а затем и вычислению эквивалентности тепла и работы (который Карно в дальнейшем и сделал).

Мимоходом, в примечании, Карно впервые объединил законы Бойля–Мариотта и Гей-Люссака одним обобщенным уравнением: $p = N(t + 267)/v$. Здесь N — постоянная, зависящая от “веса пара и выбранных единиц” (т. е. величина, названная в будущем “газовой постоянной” R). Отсюда берет начало уравнение Клапейрона, которое по справедливости должно было бы называться уравнением Карно–Клапейрона.

После рассмотрения газовых законов Карно перешел к главному: непосредственным расчетам “движущей силы тепла”. Для создания методики такого расчета применительно к циклам на разных рабочих телах С. Карно употребил блестящий искусственный прием, позволивший обойти как трудности, связанные с недостатком данных по теплофизическим свойствам, так и вещественную теорию тепла.

Для этой цели он представил свой цикл, работающий между температурами, которые отличаются на очень малую величину. Такой цикл Карно рассматривает при работе с различными газами, причем все они находятся сначала при одних и тех же температуре, давлении и объеме, расширяются изотермически до одного и того же состояния, потом адиабатно расширяются с малым понижением температуры, затем сжимаются изотермически до практически прежнего объема и, наконец, адиабатно сжимаются до первоначального состояния. При таком цикле его адиабатные части во всех случаях становятся относительно малыми и их участие в производстве работы (“движущей силы”) делается, соответственно, пренебрежимо малым. Следовательно, можно ограничиться только той работой, которая производится при изотермическом расширении за вычетом той, которая будет возвращена при изотермическом сжатии. Но по законам Шарля и Бойля давление и объем в изотермических процессах будут изменяться одинаково, независимо от того, какой газ в них используется. Следовательно и движущая сила, получаемая во всех циклах, будет одинакова. В конечном итоге это должно означать, что в соответствии с фундаментальной теоремой каждый из циклов переносит одно и то же количество теплоты (*calorique*) с верхнего температурного уровня на нижний, или, что то же самое, одно и то же количество *calorique* поглощается рабочим телом на верхней изотерме и отдается на нижней. Тепло, отдаваемое или получаемое в этих процессах, можно подсчитать, как и работу.

В конечном счете все это ведет к доказательству генеральной теоремы: *“если газ переходит при неизменной температуре от одного определенного объема и давления к другим, то количество поглощенного или выделенного calorique остается тем же самым независимо от природы газа, взятого для эксперимента”* (с. 31).

Для того чтобы определить количество тепла, подведенного к рабочему телу в изотермическом процессе 1–2 (соответствующих экспериментальных данных в то время не было), Карно воспользовался тем же приемом, который был применен им для определения связи c_p и c_v . Он заменил изотерму двумя последовательными процессами — адиабатным расширением до точки 5, давление в которой равно p_2 , и изобарным расширением 5–2, причем тоже использовал оригинальный прием, позволявший обойти существовавшие в то время трудности.

Расчеты работы описанного “узкого” цикла Карно проводил аналитически; мы для удобства изложения покажем ход расчета с помощью диаграммы состояния рабочего тела в координатах p, v (рис 15).

Как видно из диаграммы, работа цикла определяется площадью 1–2–3–4, возможностью для точного определения величины которой Карно не располагал. Но он заменил эту величину другой, равной

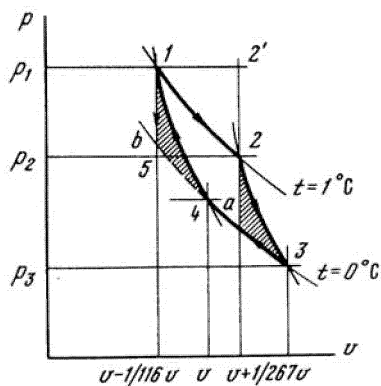


Рис. 15. “Узкий” цикл Карно на диаграмме в координатах p, v

вого спирта. Поэтому он приходит к выводу, что *“наш основной закон”* (т. е. независимость максимальной работы цикла в данном интервале температур от природы рабочего тела) *“в одном частном случае подтверждается”*.

Расставаясь с этими количественными исследованиями (и, как это ясно видно из текста, с неохотой и с надеждой к ним вернуться), он характеризует те две трудности, которые мешают преодолеть исследование и довести его до полной ясности. Характерно, что они, по существу, полностью совпадают с современным взглядом на них, изложенным выше, в начале этого раздела: во-первых, отсутствие достаточных теплофизических данных и, во-вторых, господство вещественной теории тепла. *“Чего нам недостает — это упругой силы, которую развивают твердые тела и жидкости²⁾ при заданном увеличении температуры и количестве тепла, поглощенного или выделенного при изменении объема этих тел”* (с. 51). *“Основной закон, который мы старались установить, требует, по нашему мнению, новых подтверждений, чтобы быть вне всякого сомнения; он опирается на признаваемую в настоящее время теорию тепла, которая, нужно сознаться, не представляется нам непоколебимой твердостью. Решить вопрос могут только новые опыты...”* (с. 51).

Сказано очень дипломатично, но достаточно определенно; более того, указан путь, по которому нужно идти, чтобы “решить вопрос” окончательно. Именно этим путем пошел дальше и сам С. Карно, и

произведению Δp на Δv (где Δv — разница объемов в точках 1 и 2) в цикле, т. е. вместо площадки 1–2–3–4 использовал другую: 1–2’–2–5. Если учесть, что заштрихованные треугольные площадки 2–3–a и 1–4–b примерно равны и их разностью можно пренебречь¹⁾, то такое допущение вполне корректно. Переход из 4 в 1 происходит по адиабате; отсюда, по известным данным (Пуассон), объем газа в точке 1 будет равен $v_4(1 - 1/116)$, а в точке 2 — $v_4(1 + 1/267)$.

Подсчитав таким образом полученную работу, Карно получает примерно одинаковую ее величину для воздуха, водяного пара и этило-

¹⁾ Тем более что, чем “уже” цикл по температурам, тем разница будет меньше.

²⁾ Под термином “жидкости” (les liquides) Карно подразумевает (как это вообще принято во французской научной литературе) как капельные жидкости, так и газы.

его продолжатели Р. Майер (которому опыт поставила сама природа) и Дж. Джоуль, который поставил опыты сам ¹⁾).

В третьей, заключительной части книги (не выделенной, как и предшествующие, в виде отдельного раздела) С. Карно переходит, опираясь на принципы, выведенные и обоснованные в предыдущих частях своего труда, к рассмотрению инженерных вопросов, относящихся к тепловым двигателям. Здесь ни теория теплорода, ни недостаток теплофизических данных не могли ему помешать. Напротив, сочетание существовавшего к этому времени и хорошо им изученного инженерного задела и собственных теоретических разработок позволило ему оторваться далеко вперед от своих современников и представить пути развития теплоэнергетики по крайней мере на многие десятилетия, а в некоторых вопросах вплоть до нашего времени.

Инженерный анализ и прогнозы в книге С. Карно

Начало этой части труда Карно посвящено анализу возможности использования в тепловых двигателях твердых тел и капельных жидкостей для получения движущей силы. Он приходит к четкому выводу, что как первые, так и вторые *“следует признать непригодными для этой цели: из-за малых изменений объема при нагреве и охлаждении и колоссальных механических нагрузок на соответствующие механизмы”*. Поэтому в дальнейшем Карно такие машины исключает из рассмотрения.

Напротив, пишет он, *“упругие газы и пары идеально подходят для развития движущей силы тепла”*. *“Они соединяют все условия, необходимые для выполнения этой задачи. Их легко сжимать, они обладают свойством почти неограниченно расширяться, изменения объема вызывают в них большие изменения температуры, наконец, они очень подвижны, их легко быстро нагревать и охлаждать, легко перемещать из одного места в другое, что позволяет им быстро выполнить требуемые действия.”* И далее: *“...можно представить себе множество машин, способных развивать движущую силу тепла при использовании упругих жидкостей”* (с. 52).

Опираясь на этот прогноз, Карно формулирует три основополагающих принципа, на которые нужно опираться при создании тепловых двигателей; нетрудно видеть, что это, по существу, те положения, на основе которых развивалась (и продолжает развиваться) вся теплоэнергетика. Оценить в должной степени пророчливость их автора можно, только сопоставив их с современными Карно или даже более поздними трудами французских и других теоретиков, писавших о паровых машинах (другие тепловые двигатели они вообще не рассматривали),

¹⁾ Об этом в гл. 5.

которые не могли оторваться от чисто эмпирического уровня, позволявшего вводить лишь частные улучшения. Примером может служить труд академика Араго о паровых машинах ¹⁾).

Три основных принципа Карно сформулировал так:

“1. Температура газа должна быть первоначально как можно выше, чтобы получить большое падение теплорода (calorique) и отсюда значительное развитие движущей силы.

2. По той же причине охлаждение должно быть как можно больше.

3. Переход упругой жидкости от наиболее высокой температуры к наиболее низкой должен происходить вследствие увеличения объема, т. е. охлаждение газа должно происходить только вследствие его расширения.”

Далее он проанализировал те пределы, в которых можно работать для выполнения требований, вытекающих из этих принципов. По поводу первых двух он писал: *“Предел температуры, до которой первоначально можно довести газ, — это температура, развиваемая при сгорании.” “Предел охлаждения — это температура наиболее холодных тел, которыми можно располагать в большом количестве: этим телом обычно служит вода, имеющаяся в окружающей местности.”*

Что касается третьего условия, то Карно отмечает трудности, возникающие при расширении в большом интервале температур: *“Это требует большого изменения объема ... а это, в свою очередь, — чтобы газ был первоначально взят при очень высоком давлении или достиг бы после расширения колоссального объема. Оба условия — трудновыполнимые. Первое делает необходимым употребление очень прочных сосудов для газа, находящегося одновременно при высоких давлении и температуре; второе требует весьма больших сосудов.”*

Из всего этого он делает четкий вывод, показывающий, в чем состоит основной недостаток современных ему паровых машин: работа в малом интервале температур, значительно меньшем, чем позволяет температура сгорания угля. *“В паровой машине, работающей при давлении 6 атм, температура котла 160°С, это есть тело А ... холодильник является телом В ²⁾, он поддерживается примерно при температуре 40°С. Разность температур между этими двумя телами составляет 160 — 40, или 120°С”. И далее: “Так как уголь способен сгоранием развить температуру, превышающую 1000°, а вода, которой мы располагаем в нашем климате, имеет около 10°, то легко можно получить падение теплорода в 1000° — падении, из которого только 120° используются паровыми машинами. Кроме того, эти 120° утилизируются не целиком. Всегда есть значительные потери, происходящие от бесполезного восстановления равновесия теплорода” (с. 54).*

¹⁾ Подробнее о нем говорится в гл. 4.

²⁾ Напомним, что в первой части работы Карно обозначил нагреватель (теплодатчик) как тело А и холодильник (теплоприемник) как тело В.

Важно отметить, что Карно указывает здесь не только на потери работы из-за того, что используется лишь часть возможного перепада температур, но и на потери от непосредственной теплопередачи при существенной разности температур между более и менее нагретыми частями машин. Мысль об этих потерях от необратимости теплообмена (*“бесполезного восстановления равновесия теплорода”*) просто не возникала у конструкторов и ученых — современников Карно. Нельзя не отметить, что и в наше время эти потери не всегда правильно учитываются.

Основываясь на этих общих соображениях, Карно анализирует ряд современных ему паровых машин, однозначно поддерживая тенденцию к повышению начальных параметров пара и показывая, почему оно не всегда приводит к ожидаемой экономии топлива. Например, машина Перкинса, построенная в Лондоне, несмотря на начальное давление пара 35 атм (очень высокое по тому времени), не оправдала возлагавшихся на нее надежд. Карно правильно указал причину этого — отсутствие отсечки впуска и недостаточная длина цилиндра. Пар работает только при начальном давлении 35 атм и при нем же отступает в конденсатор, практически без расширения. Вместе с тем он отмечает, что, *“несмотря на это, машина Перкинса есть ценное изобретение: она показала возможность употреблять пар значительно более высокого давления, чем это делалось до сих пор; при соответствующих изменениях она может привести к действительно полезным результатам.”*

Как видим, Карно здесь показывает классический образец научно-технической экспертизы: отмечая недостатки конструкции и указывая пути их устранения, он не забывает отметить и ее достоинства.

В примечаниях он попутно дает очень выразительную характеристику некоторым своим соотечественникам, использующим как образец английские машины: *“Здесь строят машины по моделям изобретателей, обращая мало внимания на то, какие мотивы руководили ими. Забвение¹⁾ основ часто вводило в грубые ошибки. Первоначально хорошо задуманная машина портится в руках неопытных строителей, вводящих в нее незначительные улучшения, но пренебрегающих основными условиями, которые они не сумели оценить.”* Знакомая ситуация, не потерявшая актуальности и в наше время!

Далее Карно анализирует как с теплотехнической, так и с конструктивной точки зрения многоцилиндровые машины, которые только начали разрабатываться в 20-х годах, и предсказывает их успешное развитие. Упоминает он также и машины без конденсатора с непосредственным выхлопом в атмосферу, пригодные для транспорта.

Последняя часть инженерного раздела книги Карно посвящена анализу возможностей развития газовых, в том числе воздушных, тепловых двигателей. Задача была им поставлена так: *“рассмотреть*

¹⁾ Здесь Карно деликатно заменяет слово “незнание” словом “забвение”.

употребление постоянных газов и паров, иных, чем водяной, для развития движущей силы тепла". Страницы, на которых ведется это рассмотрение, представляют особый интерес, так как здесь Карно вступил в новую область, где работы только начинались и почти никакого опыта накоплено не было. Однако, опираясь на созданную им теоретическую основу, он и здесь правильно оценил ход дела и не только дал прогноз развития таких машин, "достающий" до XX века, но и сделал попутно несколько изобретений, которые опередили свое время и были "переизобретены" намного позже.

Это прежде всего относится к использованию воздуха в качестве рабочего тела тепловых двигателей. Карно перечисляет и анализирует как преимущества воздуха перед водяным паром, так и его недостатки. Среди первых он отмечает возможность нагрева воздуха не через стенку сосуда, а при сжигании топлива непосредственно в нем. Кроме этого, становится рациональной работа без холодильника с непосредственным выпуском отработавшего воздуха в атмосферу. При этом не обязательно доводить его до низкой температуры, а надо *"заставить пойти к паровому котлу для использования оставшейся температуры"*. В целом он оптимистически оценивал возможность таких машин, хотя и предсказал, что их реализация *"на практике представляет огромные трудности, но, может быть, не непреодолимые; если их удастся победить, то воздух обнаружит большие преимущества перед водяным паром"* (это не что иное, как будущие газотурбинные электростанции с паровым циклом!).

В связи с этими соображениями он упоминает машину внутреннего сгорания Ньепсов, с которой имел дело еще его отец. Называя эту машину *"весьма замечательной и интересной"*, Карно (в очень деликатной форме) предлагает путь ее усовершенствования. *"Нам казалось бы более выгодным действовать не как Ньепсы, а сперва сжать воздух насосом, затем пропустить его через вполне замкнутую топку, вводя туда малыми порциями топливо при помощи приспособления, вполне осуществимого; затем заставить воздух выполнить работу в цилиндре с поршнем или в любом другом расширительном устройстве и, наконец, выбросить его в атмосферу..."* (с. 54). Совершенно очевидно, что эти идеи прямо ведут на путь, очень близкий к тому, по которому в дальнейшем развивались двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины.

Заканчивая рассмотрение двигателя внутреннего сгорания, работающего на воздухе, Карно делает очень интересную сноску: *"Говорят, недавно в Англии были сделаны удачные попытки развить движущую силу воздействием тепла на атмосферный воздух. Мы совершенно не знаем, в чем заключались эти попытки и были ли они произведены на самом деле."*

Действительно, в это время в Англии проводилась чрезвычайно интересная и довольно успешная работа, связанная с созданием оригинального теплового двигателя, работающего на воздухе. О ней мало было известно и в Англии, тем более во Франции, особенно при сложных политических отношениях, которые в то время были между этими

странами ¹⁾. Автором “попыток”, о которых писал С. Карно, был, как мы уже говорили, шотландский пастор Роберт Стирлинг (1790–1878), который, несмотря на свою ученую степень доктора богословия ²⁾, посвятил свои силы созданию и совершенствованию воздушного теплового двигателя. В 1816 г. Стирлинг получил Британский патент (№ 4081) на “машину, которая производит движущую силу посредством нагретого воздуха”, а затем изготовил и испытал ее успешно действующую модель. Позже — в 1827 и 1840 гг. — он получил еще два патента (№ 5456 и 8562) на усовершенствованные варианты своей машины. В 1845 г. на литейном заводе в Данди была пущена машина Стирлинга мощностью 50 индикаторных лошадиных сил, успешно проработавшая в течение трех лет.



Рис. 16. Р. Стирлинг

Перед тем как рассказать о дальнейшей интересной и очень поучительной судьбе идей и разработок Стирлинга, необходимо найти их связи с теоретическими положениями и прогнозами С. Карно.

Прежде всего, важно отметить, что в то время, когда Стирлинг создавал свой двигатель (за 8 лет до выхода работы С. Карно), теории тепловых машин, по существу, не было. Тем не менее патент Стирлинга показывает, что он совершенно четко представлял все условия, необходимые для наиболее эффективного превращения тепла в работу, впоследствии столь блестяще сформулированные Карно.

Стирлинг, не будучи теоретиком высокого класса, лишь кратко излагал свои идеи в патентах, не претендуя на широкие обобщения, и тут же с истинно британской практичностью и упорством реализовывал их на практике. Тем не менее предложенный им цикл, названный впоследствии его именем, должен занимать в термодинамике важное место. Обладая несколько меньшей общностью, он, как и цикл Карно, может служить идеальным образцом для оценки процессов взаимного преобразования тепла и работы.

¹⁾ Напомним, что Дж. Уатт совершил все же два путешествия во Францию: в 1784 г. (со своим компаньоном Болтоном) и 1803 г. Он был с почетом принят академиками Лапласом, Монжем и Бертолле; в первой встрече участвовал и Лавуазье. Но Уатт был мировой знаменитостью, и только поэтому его второй визит стал возможным, несмотря на обостренные отношения между Францией и Англией.

²⁾ В некрологе, посвященном его памяти, помещенном в газете “Таймс” (11 июня 1878 г.), было выражено сожаление по поводу того, что “д-р Р. Стирлинг не оставил после себя ни одного богословского произведения”.

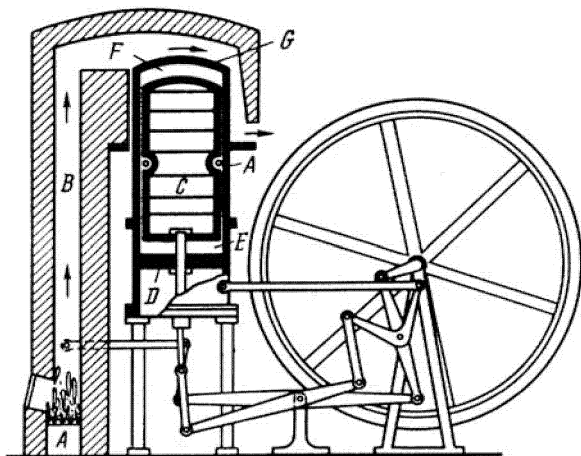


Рис. 17. Принципиальная схема двигателя Стирлинга

На рис. 17 показана конструктивная схема двигателя Стирлинга, взятая из его патента 1816 г.

Отметим прежде всего, что эта машина должна быть отнесена к воздушным двигателям внешнего сгорания; горячие дымовые газы, проходя по каналу *B* из топки к головке *G* цилиндра *H*, нагревают ее, после чего выпускаются в атмосферу. Рабочее тело (воздух) находится в замкнутом пространстве, образованном цилиндром *H* и поршнем *D*. Это пространство разделено на две полости *F* и *E* подвижным вытеснителем *C*, помещенным в цилиндре с некоторым радиальным кольцевым зазором. При движении вытеснителя *C* вверх воздух через этот зазор переталкивался из верхней горячей полости *F* в нижнюю, холодную полость *E*; при перемещении вытеснителя вниз охлажденный воздух перемещался в горячую полость *F*. Таким образом, воздух, заключенный в цилиндр *H*, попеременно то нагревался (в полости *F*), то охлаждался (в полости *E*) с соответствующими периодическими повышениями и понижениями давления. Поршень *D* соединен с механизмом движения через трубчатый шток таким образом, чтобы при повышении давления двигаться вниз, производя работу (при увеличении объема), и вверх (с уменьшением давления) при понижении давления, возвращая некоторую ее часть. Разность этих работ приводит в движение маховик и передается потребителю.

Существенно новым здесь было не только осуществление внешне-го нагрева, но и наличие вытеснителя, периодически перемещающего рабочее тело из холодной полости в теплую и обратно. Но наиболее важным с точки зрения теплотехники вообще была впервые использованная Стирлингом *регенерация тепла* — процесс, сыгравший в дальнейшем огромную роль, далеко выходящую за пределы первоначально-го использования в его двигателе. Идея заключалась в том, чтобы при переталкивании из холодной полости *E* в теплую *F* нагреть воздух

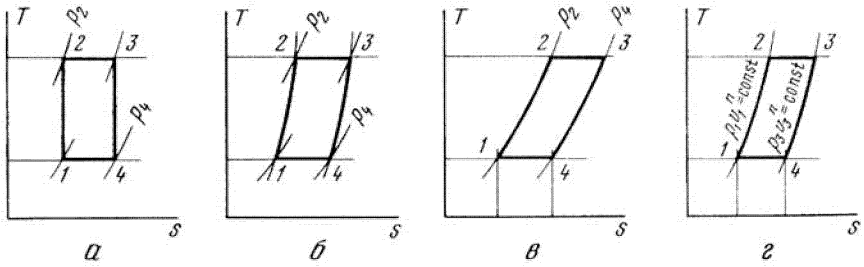


Рис. 18. Изображение цикла Карно (а) и регенеративных циклов Стирлинга (б), Эриксона (в) и Рейтлингера (г) в координатах T, s

при протекании его в зазоре между горячими поршнем и цилиндром. Напротив, при переталкивании из теплой полости F в холодную E воздух отдавал тепло в зазоре при контакте со стенками цилиндра и вытеснителя, охлажденными до этого холодным воздухом, шедшим в противоположном направлении. Так, используя теплоемкость стенок (а затем и проволоки, специально намотанной на вытеснитель), осуществлялся внутренний теплообмен между потоками воздуха, переходящими из теплой полости в холодную и обратно. Такая регенерация тепла позволяла уменьшить расход топлива на нагрев в горячей полости (так как воздух поступал туда предварительно подогретым) и охлаждающей воды в холодной (так как воздух предварительно охлаждался).

Цикл Стирлинга в идеализированном виде показан на рис. 18 в координатах T, s ; рядом для сравнения представлен цикл Карно, работающий в тех же условиях. Видно, что энергетические характеристики (количество подведенного и отведенного тепла, работа цикла) в обоих случаях совершенно одинаковы. Единственное (и притом очень существенное) различие заключается в том, что “косой” цикл Стирлинга в том же температурном интервале работает благодаря регенерации тепла в существенно меньшем интервале давлений, чем цикл Карно, сохраняя ту же эффективность. Это, как известно, и определяет основное преимущество, которое дает регенерация тепла как в прямых, так и в обратных газовых циклах.

Возникает вопрос, как согласовать со свойствами цикла Стирлинга категорическое утверждение Карно, относящееся к идеальным циклам: *“...наиболее выгодный способ употребления тепла для получения движущей силы тот, при котором все изменения температуры, происходящие в телах, протекают при изменении объема. Чем строже выполнено это условие, тем выгоднее использовать тепло”* (с. 25). Ведь в нем все изменения температуры (процессы 1–2 и 3–4) происходят без изменения объема!

На первый взгляд существование такого идеального цикла, столь же эффективного, как цикл Карно, противоречит этому правилу. Однако

это противоречие лишь кажущееся¹⁾.

В чем суть условия Карно? Она состоит в том, чтобы исключить внешние подвод и отвод тепла не по изотермам. А это означает, что изменения температуры рабочего тела должны протекать только тогда, когда производится работа, т.е. при изменении объема, иначе неизбежно пришлось бы подводить (или отводить) тепло при температурах, отличных от температур теплоотдатчика (или теплоприемника). Другими словами, требование обязательного изменения объема при изменении температуры есть лишь следствие основного требования — подвода тепла от теплоотдатчика (на верхнем температурном уровне) и его отвода к теплоприемнику (на нижнем уровне) только по изотермам.

В цикле Стирлинга это фундаментальное требование строго выполняется, однако благодаря регенерации (внутреннему теплообмену, не затрагивающему внешние источники и приемники тепла) удается при изменении температуры сохранить объем постоянным.

Таким образом, существо условия Карно полностью остается в силе. Меняется лишь признак, по которому определяется его выполнение; для цикла Стирлинга, в котором верхняя и нижняя изотермы соединены изохорами, он не работает. Кстати говоря, цикл Стирлинга — единственный из регенеративных циклов, в котором объем при изменении температуры не меняется. Во всех остальных существующих (и принципиально возможных) регенеративных циклах условие Карно соблюдается.

Так или иначе работы Стирлинга показали, что помимо цикла Карно есть и другой способ сделать тепловую машину обратимой; однако это ни в какой степени не затрагивает основных идей Карно. Несомненно, что знакомство с работами Стирлинга обогатило бы информационную базу, на которую опирался Карно, и дало бы ему новый материал для обобщений и подтверждений открытых им законов. Однако нет никаких данных о том, что он после 1824 г. смог что-либо узнать о Стирлинге и его достижениях.

Что касается дальнейшего развития и реализации на практике идей Р. Стирлинга, то события развивались по той же классической схеме, которая характерна для всех изобретений, опередивших в том или ином отношении свое время. Здесь представляют интерес как практическая сторона дела, так и термодинамическая теория.

Работа по созданию действующего образца двигателя шла вначале хоть и с трудом, но более или менее успешно. Машина 1845 г. продемонстрировала многообещающие показатели. При мощности 50 индикаторных лошадиных сил (31,5 л.с. на валу) она имела цилиндр диаметром 16 дюймов (406 мм) и ход поршня 4 фута (~1220 мм). Температура подогрева T_1 составляла 650°F (~345°C) и охлаждения — $T_2 \sim 150^\circ\text{F}$ (~65°C). Сохранились данные и по расходу топлива:

¹⁾ В некоторых учебниках термодинамики (напр., в курсе И. П. Базарова “Термодинамика”, М.: “Высшая школа”, 1991, С. 309) идеальный цикл Стирлинга ошибочно трактуется как необратимый.

1,7 фунта угля (0,782 кг) на индикаторную лошадиную силу в час, или 2,7 фунта (1,23 кг) на валу. Теплота сгорания топлива составляла около 13 000 БТЕ на фунт (30 230 кДж/кг). Эти величины дают возможность подсчитать энергетические характеристики двигателя.

Индикаторный КПД машины

$$\eta_{\text{инд}} = \frac{0,7355 \cdot 3600}{0,782 \cdot 30230} = 11,4\%.$$

Высокий уровень этих показателей наиболее наглядно виден, если учесть, что это значение индикаторного КПД получено при сравнительно низкой температуре T_1 нагрева — всего 345°C. По отношению к циклу Карно (или, что то же самое, Стирлинга), работающему без потерь в том же интервале температур, КПД η_e (эксергетический КПД) составляет

$$\eta_e = 11,4 : \frac{345 - 65}{345} = 19\%.$$

Это очень высокий показатель термодинамического совершенства машины. Механический КПД ($\eta_{\text{мех}} = 1,7/2,7 = 63\%$) низок, что вообще характерно для машин того времени, в которых потери на трение были весьма значительны. Однако общий эффективный КПД двигателя был все же неплохим ($\eta_{\text{эф}} = 11,4 \cdot 0,63 = 7,2\%$), это выше не только чем у паровых машин, которые анализировал Карно, но и более совершенных, появившихся в 40-х годах.

Однако через три года машина Стирлинга была брошена “из-за постоянной порчи нагревательных приборов”. Другими словами, материал стенок горячей части цилиндра не выдерживал одновременного действия высокой температуры и внутреннего, периодически меняющегося давления. Дала себя знать одна из тех “огромных трудностей” в виде “быстрой порчи цилиндра и поршня”, о которых писал С. Карно. Преодолеть это препятствие на уровне техники того времени было невозможно.

Естественно, что поршневые двигатели внутреннего сгорания (сначала Отто, а потом и Дизеля), появившиеся на 60–70 лет позже, у которых высокая температура в цилиндре достигалась без существенного нагрева его стенок, оказались вне конкуренции. Ни паровая машина, ни воздушный двигатель внешнего сгорания Стирлинга (как и воздушные двигатели других изобретателей, например Д. Эриксона) не шли с ними в сравнение по большинству показателей.

Стирлинг даже в то время, когда двигатели внутреннего сгорания начали занимать ведущие позиции, не терял уверенности, что со временем, когда качество металла улучшится, его машина займет должное место. Он писал в 1878 г.: “Если бы бессемеровские железо и сталь были известны 35–40 лет назад, то мало было бы сомнений в том, что теперь воздушный двигатель имел бы большой успех. Он остается для квалифицированных и стремящихся к цели механиков

будущего”¹⁾). Предсказание Стирлинга начало сбываться с 50-х годов XX века. “Огромные трудности”, как и предвидел С. Карно, оказались “не непреодолимыми”. Сейчас работы по двигателям Стирлинга продвинулись достаточно далеко: созданы промышленные образцы и малые серии эффективных, практически бесшумных, безразличных к источникам тепла и хорошо регулируемых двигателей²⁾). Что же касается машин, работающих по обратному циклу Стирлинга, то они доведены до высокой степени совершенства и прочно заняли ведущее место в современной криогенике.

Влияние цикла Стирлинга на развитие термодинамической теории было весьма существенным, что, к сожалению, осознано еще не всеми специалистами. Вслед за ним появились и другие аналогичные регенеративные циклы — Эриксона (1853 г.) с изобарной регенерацией и Рейтлингера (1873 г.) с регенерацией, проходящей по политропам. Сопоставление их с циклом Карно показано на рис. 18. Все они по эффективности равны циклу Карно. Наконец в 1874 г. А. И. Вышнеградский дал обобщенную теорию регенеративных циклов, эквивалентных циклу Карно. Тем самым он довел до логического завершения теорию Карно в части, относящейся к взаимным преобразованиям тепла и работы посредством циклов, ограниченных двумя изотермами.

Инженерный прогноз в книге Карно представляет собой первую в истории теплотехники попытку определить, пользуясь современным термином, КПД паровой машины. Цель определения этой величины была по существу та же, которая преследуется и сейчас при вычислении КПД. Карно нужно было *“показать, как мы далеки при современных средствах от возможности использовать всю движущую силу топлива”* (с. 60). До него даже попытки поставить такой вопрос никто серьезно не предпринимал. Это и понятно, поскольку никаких представлений о некоторой предельной работе, которую можно получить от единицы тепла в заданных температурных условиях, тогда не было.

Для определения максимальной работы Карно выбрал предельно возможную, с его точки зрения, верхнюю температуру цикла — 1000°C и нижнюю — 0°C. Ранее, при сопоставлении циклов на разных рабочих телах, им была подсчитана величина работы цикла на водяном паре в интервале от 100 до 99°C; она составляла приблизительно 1,12 единицы движущей силы (эта единица равнялась 1000 кгм) на 1000 единиц теплоты (за единицу теплоты принималась 1 ккал).

Далее Карно рассуждал так: *“Если бы движущая сила была пропорциональна падению теплорода (т. е. разности температур — В. Б.) и была бы одна и та же при любых термометрических градусах, то не было бы ничего проще, как определить ее в пределах от 1000 до 0°; она равнялась бы $1,12 \cdot 1000 = 1120$ единиц работы, но так как этот закон*

¹⁾ Цит. по: Радциг А.А. История теплотехники. М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1936. С. 11.

²⁾ См. Ридер Г., Хупер У. Двигатели Стирлинга. М.: Мир, 1986.

только приближенный и, быть может, сильно отличается от истинного при высокой температуре, то мы можем сделать только грубое вычисление. Положим, что число 1120 нужно уменьшить вдвое, т. е. свести его до 560” (с. 61).

Из этих строк видно, что Карно понимал качественное отличие одних и тех же температурных интервалов на разных уровнях с точки зрения их работоспособности, но еще не располагал значениями функции $F(t)$ для точного расчета. В этой ситуации введение некоторого “коэффициента незнания”, существенно меньшего единицы, было единственно правильным решением ¹⁾.

Далее Карно, выбрав в качестве примера наиболее экономичные по расходу топлива большие двухцилиндровые английские паровые машины, установленные на рудниках Корнуэльса, подсчитывает работу, которую они производят на 1 кг сжигаемого угля (принимая теплоту сгорания 7000 ккал/кг). Он получает в результате 195 единиц движущей силы на 1 кг угля. Сравнивая эту величину с теоретически максимальной “движущей силой”, получаемой от сжигания 1 кг угля ($560 \cdot 7 = 3920$), Карно приходит к выводу, что в этом случае “только 1/20 движущей силы горения была использована”, или, говоря на современном языке, эффективный КПД равен 5%. Точный расчет дает значение эффективного КПД для этого случая $\eta_{\text{эф}} = 6,5\%$. Как видим, Карно получил величину КПД, близкую к истинной, чему можно удивляться, если учесть все те неопределенности, через которые ему приходилось прорываться.

Таким образом Карно впервые показал, как далеки от совершенства паровые машины его времени и какие широкие возможности остаются для их совершенствования. Вместе с тем он отчетливо понимал разницу между предельными теоретическими возможностями и инженерной практикой; он тут же написал об этом с завидной четкостью: “Нельзя надеяться хотя бы когда-либо практически использовать всю движущую силу топлива. Попытки, сделанные для приближения к этому результату, будут скорее вредными, чем полезными, если они заставят забыть другие важные обстоятельства. Экономия топлива — это лишь одно из условий, которые должны выполнять тепловые машины; при многих обстоятельствах оно второстепенно, оно частично должно уступать первенство надежности, прочности и долговечности машины, малому занимаемому месту, дешевизне ее установки и т. д.” (с. 61).

На этом Карно заканчивает рассмотрение комплекса вопросов, непосредственно связанных с “движущей силой тепла”, рассмотрение, которое заложило фундамент новой науки — термодинамики — и дало

¹⁾ Если подсчитать точное значение этого коэффициента, равного отношению факторов Карно $(T_1 - T_2)/T_1$ в интервалах 100–99° и 1000–0°, то он окажется равным 2,93; Карно и здесь был довольно близок к правильному результату.

в конечном счете мощный импульс к развитию связанных с ней многочисленных отраслей технологии и техники.

Последний абзац книги Карно “Размышления о движущейся силе огня...” свидетельствует, насколько широка область интересов С. Карно, глубоко понимание общетехнических задач и их связи с экономикой и технической политикой. Он продолжает линию своего отца — ученого, инженера, организатора и политика, не замыкавшегося в рамках чисто научных интересов; эта черта характерна и для других выдающихся деятелей, выдвинутых французской революцией.

Авторская мысль, высказанная в этом заключительном аккорде, звучит как нельзя более современно и заслуживает того, чтобы привести ее полностью: *“В каждом случае суметь использовать должным образом и экономичность, отделить наиболее важные, условия от второстепенных, подходящим образом их сбалансировать, чтобы наиболее простыми средствами достигнуть наилучших результатов — таковы должны быть основные способности человека, призванного управлять и приводить в согласие между собой работы себе подобны, чтобы заставить их действовать для какого-либо полезного дела”* (с. 61).

Если суммировать все то, что Карно сделал и опубликовал в своей небольшой по объему книге, то получится список открытий, изобретений и прогнозов, почти не имеющий себе равных в истории науки и техники. Его вклад — основа новой науки о тепловых явлениях и их использовании — сравним только с тем, что дали такие гиганты, как Галилей или Фарадей. Первый заложил основы новой механики, второй — учения об электричестве. Но каждый из них прожил долгую жизнь, а Сади Карно опубликовал свой труд, когда ему было всего 28 лет, а умер, когда ему не исполнилось и 37. Отношение общественности к трудам Галилея, Фарадея и других крупнейших ученых было разным, но равнодушным его никак назвать нельзя. Работа Карно, напротив, как это ни кажется невероятным, была встречена с полным безразличием.

При определении места, которое занимают исследования Карно в науке, необходимо учесть и то, что он сделал уже после выхода “Размышлений...”, но не успел закончить и опубликовать. Его записи пролежали в сейфе младшего брата Ипполита Карно и были опубликованы им лишь в 1878 г., т. е. стали известны через 46 лет после смерти автора. В результате эквивалентность тепла и работы, а следовательно, и закон сохранения энергии пришлось открывать заново. Всему этому посвящена следующая глава.

Глава 4

Книга С. Карно и деятели науки Франции. Труды и дни инженера-капитана (1824-1832)

Как современники приняли книгу С. Карно

“Размышления о движущей силе огня...” были выпущены достаточно большим для того времени тиражом: 600 экземпляров по цене 3 франка за экземпляр. Печаталась книга за счет автора; Карно она обошлась в 459 франков 55 сантимов. Никаких специальных действий для рекламы книги ни сам Карно, ни издательство Башелье, сверх обычно принятых, не предпринимали: книга была включена наряду с другими в очередной каталог выпущенных изданий.

В июле 1824 г. появилось краткое сообщение о ее выходе в “Annales de science et de commerce”. Автор книги не был известен в научных и инженерных кругах, так как до выхода “Размышлений...” не было никаких его публикаций, которые могли бы, с одной стороны, подготовить научную общественность к восприятию новых идей, а с другой — ввести в научный обиход новое имя. Все это сыграло определенную негативную роль в будущей судьбе его книги.

Точно известно, что Сади послал несколько экземпляров в библиотеку своей alma mater — Политехнической школы, в Консерваторию искусств и ремесел и некоторым известным ученым. Однако документальных данных об этом не сохранилось; известен только один экземпляр “Размышлений...” с дарственной надписью Г. Прони¹⁾. Через несколько дней после выхода книги, 14 июня 1824 г., академик П. Жирар по просьбе С. Карно сделал краткое сообщение о ней в Академии наук, об этом есть извещение в “Procès Verbaux de l’Académie” (1824. V. 8. P. 101).

П. Жирар (1735–1836), академик по секции общей физики, главный инженер Управления дорог и мостов, был достаточно заметной фигурой в научных и инженерных кругах Франции. Член многих важных комиссий, учреждавшихся академией, он принадлежал, как и Прони,

¹⁾ Гаспар Клэр Прони (1755–1839) — математик и механик, член Национального института с 1795 г., в 1795–1815 гг. — профессор Политехнической школы. Изобрел динамометрический тормоз для измерения мощности двигателей (“тормоз Прони”). Лазар Карно спас его от гильотины в годы террора, когда он по ложному обвинению попал под суд.

ANNEXE I

Facture de l'imprimeur des *Réflexions*... (*)

*Imprimerie de Guiraudet et Galley,
Rue Saint-Honoré, N° 315, vis-à-vis Saint-Roch.*

*Mémoire des Impressions faites au compte
de Monsieur Carnot
pendant le mois de Mai*

Paris, le 2 Juin 1824

Réflexions sur la puissance du feu etc.		
in 8° cicero.	7 feuilles 3/4. Comp. ^é à 12 F	93.
	44 pag. petit rom	8.
	32 lignes, opérations en petit rom	3,20
	30 id. id. en cicero	2,50
	3 Tableaux à 1,50 F	4,50
	2 id. à 2,50	5.
	Correction des fs. 1,2 et 3 (9 hres 1/2)	4,25
	id. des fs. 4 et 5 (10 hres 1/2)	5,25
	id. f ^o 5 (2° fois) et f ^o 16 (13 hres 1/2)	6,75
	Tirage à 600 exemplaires, à 7,20 F. la fe.	57,60
		<hr/>
		190,05
	Etoffes à 60 %	114.
	9 Rx. 6 ms. papier à 13,50	125,50
	brochage	30.
		<hr/>
	Pour acquit	459,55
	(signé) Guiraudet et Galley	

Рис. 19. Счет издательства Башелье за издание книги С. Карно

к старшему, романтическому поколению ее деятелей, был участником египетского похода Наполеона. То, что Карно обратился именно к нему, было вполне естественно. Жирар написал много трудов по гражданским инженерным дисциплинам, в частности по использованию энергии воды и ветра. Среди других его работ были и относящиеся к паровым машинам; в одной из них он провел исследование по обеспечению безопасности паровых машин высокого давления.

Через полтора месяца, 26 июля 1824 г., на собрании той же секции академии Жирар сделал более развернутый устный доклад о работе С. Карно. На этом заседании были практически все научные светила

Франции: Араго, Прони, Дюпен, Навье, Лаплас, Фурье, Ампер, Гей-Люссак, Пуассон, Дюлонг, Лежандр, Френель и др. Многие из них могли вспомнить, какую роль в их жизни сыграл “великий Карно” — отец автора обсуждаемой работы.

Жиран в очень доброжелательном тоне представил работу С. Карно и ее основные результаты. Ее изложение за подписью Жирана было опубликовано в журнале “Revue Encyclopedique” (1824. Vol. 23) в разделе “Новые книги”¹⁾. Для оценки ситуации и дальнейших событий целесообразно привести его целиком.

“После краткого изложения известных данных о движущей силе тепла, истории паровых машин, их использовании и влиянии на развитие промышленности и будущее человечества автор замечает, что, несмотря на удовлетворительный уровень, достигнутый паровыми машинами, их теория слабо развита, а попытки их улучшения делаются почти наугад. По мнению автора, это объясняется тем, что получение движения посредством тепла не рассматривалось в достаточно общем виде, независимо от других процессов. Однако производство движения в паровых машинах всегда сопровождается обстоятельством, на которое надо обратить особое внимание, а именно восстановлением равновесия теплорода²⁾, т. е. его переходом от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Если принять этот принцип, становится очевидным, что повсюду, где существует разность температур, повсюду, где может произойти восстановление равновесия теплорода, может также происходить производство движущей силы. Для производства этой силы используют постоянные газы или пары некоторых жидкостей, так как их объем значительно больше, чем объем твердых тел, подвержен изменениям под воздействием не очень больших изменений температуры. Мы не будем повторять здесь примеры, приводимые автором, и объяснения, которые он дает этим явлениям; ограничимся его выводами. Первый состоит в том, что механизм движущей силы, возникающей в результате применения пара, является также максимумом движущей силы, которого можно достигнуть каким бы то ни было другим способом. Но каков здесь смысл выражения “максимум движущей силы”? Автор считает, что необходимое условие состоит в том, что в веществах, применяемых для использования движущей силы тепла, не должно происходить никаких изменений температуры, которые не были бы вызваны изменением объема.

¹⁾ Это было достаточно престижное в научном мире издание (о чем говорит хотя бы то, что вслед за отчетом о книге С. Карно рассматривались два труда Ампера), посвященное широкому кругу вопросов. Как следует из подзаголовка журнала, это “систематический анализ наиболее примечательной литературы по наукам и ремеслам с участием членов Института и других ученых”.

²⁾ В этом документе в соответствии со сложившейся традицией слово “chaleur” переводится как “теплота”, а “calorique” как “теплород”. Характерно, что Жиран употреблял эти термины так же, как и Карно.

Господин Карно, обобщая свою мысль, насколько он это находит возможным, применяет сказанное о водяном паре к попеременно расширяемому и сжимаемому атмосферному воздуху и заключает: движущая сила теплоты не зависит от факторов, действующих для ее реализации; ее количество устанавливается только температурой тел, между которыми в конечном счете происходит переход теплорода. Он устанавливает далее, что, когда газ переходит, не меняя температуры, от одного определенного объема к другому объему и другому давлению, также определенным, количество поглощенного или выделенного теплорода остается тем же, какой бы газ ни был избран для опыта. Поскольку те экспериментальные данные, которыми мы располагаем в настоящее время, не позволяют строго определить закон, согласно которому движущая сила меняется на различных уровнях температурной шкалы, г-н Карно поставил перед собой задачу определить абсолютную величину в одном и том же интервале в один градус термометра атмосферным воздухом, водяным паром и паром спирта. Рассуждения и расчеты, которые приводят его к этой оценке, могут быть прослежены только непосредственно в его работе. Он полагает, что эта часть его работы нуждается еще в подтверждении с помощью новых проверок. Можно, безусловно, создать множество машин, способных развивать движущую силу тепла путем применения упругих газов, но при создании этих машин никогда нельзя терять из виду три принципа: 1) температура газа сначала должна быть доведена до максимума, чтобы получить сильное падение теплорода и, следовательно, большее производство движущей силы; 2) по той же причине охлаждение должно быть также максимальным; 3) надо, чтобы переход упругого газа от самой высокой к самой низкой температуре вызывался увеличением объема, т. е. чтобы охлаждение газа вызывалось непосредственно его расширением. К сожалению, применение этого третьего принципа труднее всего осуществить, так как для газа под высоким давлением нужно применять сосуды высокой прочности; с другой стороны, нужно, чтобы их емкость была достаточно велика, чтобы газ при разрежении мог перейти от очень высокой к очень низкой температуре. При выполнении эти два условия кажутся до некоторой степени несовместимыми. Преимущество машин высокого давления состоит главным образом в способности использовать большее падение теплорода. Но недостаточно применять пар под большим давлением; надо его применять также при последовательном ступенчатом расширении.

На этом принципе основан патент, полученный в 1782 г. знаменитым Уаттом, которому мы обязаны, как это следует признать, почти всеми крупными усовершенствованиями паровых машин. Применение того же принципа к машине с двойным цилиндром, изобретенным Хорнбловвером и усовершенствованным Вульфом, относится примерно к тому же времени. Несмотря на все эти улучшения, необходимо еще очень многого добиться в этом плане.

Автор приводит доказательства этому, напоминая, что один килограмм угля, сожженного в калориметре, может дать 7000 единиц

теплоты, с помощью которых можно было бы, согласно теории, произвести по крайней мере 3920 единиц движущей силы. Однако в наиболее совершенных машинах, созданных до сих пор, 1 кг угля дает только 195 единиц движущей силы и только 22 — в машинах самой старой конструкции, таких, как машины Шайо; их результаты в 180 раз ниже тех, которые дает теория. Тем не менее, если практические усилия должны быть направлены на приближение к теоретическим результатам, следует помнить также о том, что экономия топлива по многим обстоятельствам представляет собой второстепенное условие; на первом плане должны быть надежность, прочность, продолжительность жизни машины, размеры занимаемого ею пространства и, наконец, дешевизна монтажа.

Хотя размышления о движущей силе огня, которые мы стремились изложить, занимают небольшое количество страниц, трудно было бы дать о них точное представление с помощью более краткого анализа, чем тот, который мы сделали; эта работа содержит свежие идеи, сдержанность изложения которых никак не сказывается на точности формулировок. Г-н Карно не боится затрагивать трудные вопросы, и из этой первой работы видно, что он способен углубить теорию, ставшую сегодня одной из наиболее значительных в математике и физике.”

Из этого документа видно, что Жирар высоко оценил как тему работы Карно, так и ее содержание (“теорию, ставшую одной из наиболее значительных в математике и физике”). Отметил он даже сдержанную и точную форму изложения. Наконец, он дал лестную характеристику самому автору, который “не боится затрагивать трудные вопросы” и “способен углубить теорию”, заслужившую столь высокую оценку.

Вместе с этим нужно отметить, что Жирар оставил в стороне введение понятий цикла, занимающего центральное положение в работе Карно. В связи с этим он упустил из виду ту работу, которая должна быть возвращена при обратном ходе поршня. Не обратил он внимания и на те сомнения, которые С. Карно высказал в отношении вещественной теории тепла. Если же рассмотреть доклад Жирара в целом, то, учитывая уровень теоретической теплотехники того времени, можно только удивляться тому, насколько основательно он вник в содержание работы Карно и правильно оценил ее фундаментальное значение.

Казалось бы, положено хорошее начало. Однако обращают на себя внимание два настораживающих обстоятельства. Первое из них (чисто формального плана) заключалось в том, что академия не дала рекомендацию к опубликованию отчета об обсуждении работы С. Карно в “*Proces Verbaux de l'Academia*” — официальном академическом издании (что должно было бы последовать за высокой оценкой). Публикация в “*Revue Encyclopedique*” была рангом ниже. Второе, более важное обстоятельство — полное молчание всех именитых академиков. Никаких обсуждений, дискуссий, возражений, похвал или порицаний не последовало. Но и на другом, менее высоком, инженерном уровне также никакой реакции на книгу С. Карно и отзыв Жирара не было. Так закончился 1824 г.

В последующие годы обстановка мало изменилась. Известно только, что Н. Клемент, профессор прикладной химии в Консерватории искусств и ремесел, который был близко знаком с С. Карно, рекомендовал его книгу своим слушателям на лекции 10 января 1825 г. На ней присутствовал и сам автор книги, объяснявший свою теорию тепловых машин.

В 1829 г., т. е. еще через четыре года, в уже упомянутом академическом издании “*Proces Verbaux*” был помещен отзыв на статью Г. Кориолиса о паровых машинах. В длинном списке литературы, помещенном в конце отзыва, в числе прочих без всяких комментариев упоминается и фамилия Карно¹⁾. Во всех других статьях и книгах о паровых машинах, вышедших в то время, в том числе и в книге Араго, три издания которой появились уже после 1824 г. (1829, 1830 и 1837), никаких упоминаний ни о работе Карно, ни о его разработках нет. Нужно еще добавить, что раскупалась книга вяло. Во всяком случае, в 1829 г. она числилась в списке тех экземпляров, которые еще имелись на складе фирмы Башелье. Так, эта “книжка небольшая томов премногих тяжелей” (если воспользоваться отзывом А. А. Фета на сборник стихов Ф. И. Тютчева) не была понята при жизни ее автора никем. Научный и инженерный мир Франции не проявил ни в какой форме интереса к работе С. Карно. В последующие годы издательство Башелье выпустило целую серию книг о паровых машинах: М. Никольсона (1826), Л. Вулазо (1838), А. Фурье (1837), Т. Тресгольда (1828), Ф. Рамбура (1839, 1840, 1844, 1845). Ни в одной из них нет упоминания о работе С. Карно.

Судьбы великих научных трудов, знаменовавших переход целой отрасли в новое качественное состояние, были самыми разными, иногда очень тяжелыми, но ситуация, сложившаяся вокруг работы Карно, не имеет прецедентов в истории науки. Относительно редки случаи, когда новые работы такого уровня встречали если не восторженный прием, то понимание и почти сразу “брались на вооружение” ученым сообществом. Другие труды будущих классиков после выхода вызывали разногласия — научный мир делился на сторонников и противников; признание приходило позже, после острой дискуссии. Наконец, не так редко встречается и третий случай — неприятие, резко враждебное отношение, которое удавалось преодолеть только через более или менее долгий срок. Иногда такая враждебность, доходящая до травли, приводила к трагическим последствиям; можно вспомнить судьбу Р. Майера, доведенного до психиатрической больницы, или Л. Больцмана, покончившего жизнь самоубийством.

Реакция (вернее, ее отсутствие) на труд Карно уникальна. Ее во многом можно сопоставить лишь с той, которая была проявлена Французской академией наук по отношению к работам гениального

¹⁾ Характерно, что она была дана без указания имени, и только по предмету обсуждения можно догадываться, что это был именно Сади Карно, а не его отец.

математика Э. Галуа (1811–1832) — соотечественника и современника С. Карно. Такое сопоставление уместно потому, что позволяет лучше представить общую обстановку в научной среде Франции, и в частности в Академии наук, сложившуюся к 20-м годам XIX века.

Первая работа Галуа “Доказательство одной теоремы о периодических непрерывных дробях” была написана им в возрасте 17 лет и напечатана в журнале “Анналы математики”. Ее появление никого не заинтересовало. Затем в рукописи, посланной во Французскую академию в 1829 г., он развил очень сжато основы нескольких величайших математических теорий века. Секретарь академии Фурье послал работу Галуа на отзыв академику Коши, который ее потерял (или выбросил), так же как и рукопись другого великого математика — норвежца Н. Абеля.

В это время Галуа был учеником школы Людовика Великого (Луиле-Гран). Интересно, что на конкурсе работ по математике он занял пятое место. Решение Галуа было слишком кратким, а изложение — сжатым. Одержал победу и получил вместе с ней право поступления без экзаменов в Политехническую школу некто Браве, сделавшийся впоследствии профессором Политехнической школы и академиком. Галуа, напротив, экзамен по математике при поступлении в Политехническую школу не выдержал!

В 1830 г., будучи учеником подготовительной школы (открытой в 1826 г. после закрытия Бурбонами “рассадника крамолы” — знаменитой Нормальной школы), Галуа последовательно опубликовал три работы. В них сжато сообщались отдельные результаты, полученные как “часть исследований в области теории перестановок и алгебраических уравнений”. Никакой реакции на них не последовало. Более полную работу с изложением своей теории он представил в том же году на конкурс в Академию. Рукопись тоже была потеряна. Автор по его просьбе был принят Араго и Пуассоном; последний предложил снова написать работу и выслать в Академию. После некоторого колебания Галуа восстановил рукопись, снабдил ее более подробным комментарием и 16 января 1831 г. послал в Академию. Рукопись объемом 11 страниц называлась “Об условиях разрешимости уравнений в радикалах”. Это была третья (и последняя) попытка быть понятым на Олимпе французской науки. В октябре 1831 г. он получил ответ из Академии, подписанный Араго: “Дорогой мсье Галуа, Ваша рукопись была послана для ознакомления мсье Пуассону. Он возвратил ее нам с отзывом, который мы здесь приводим”.

Пуассон написал так: “Мы приложили все усилия, чтобы понять доказательства мсье Галуа. Его рассуждения недостаточно ясны, недостаточно развернуты и не дают возможности судить, насколько они точны. Мы не в состоянии в этом отзыве даже дать наше мнение о его работе.

Автор заявляет, что теорема, которой посвящена его работа, является частью общей, широко применяемой теории. Часто разные части теории взаимно объясняют одна другую и становятся более понятными, когда они изложены в совокупности, а не отдельно. Поэтому, чтобы

составить определенное мнение, нужно подождать, пока автор опубликует работу полностью”.

В конце Араго добавляет: “На этом основании мы возвращаем Вашу рукопись и надеемся, что Вы извлечете из замечаний мсье Пуассона пользу для Вашей дальнейшей работы”. Как написал позже Галуа, “Пуассон либо не захотел, либо не смог меня понять”¹⁾.

Наконец, 29 мая 1832 г., в ночь перед странной дуэлью, во время которой (или после которой) он был смертельно ранен²⁾, Галуа написал свой последний и самый важный труд. Изложение было также кратким. На полях рукописи Галуа сделал надпись: “У меня нет времени”.

В больнице, куда его доставили смертельно раненным, он успел передать своему младшему брату Альфреду просьбу собрать и опубликовать все его математические рукописи. Альфред выполнил волю своего брата: вместе с друзьями Галуа добился, что его работы были напечатаны (в 1846 г.), подверглись тщательному изучению и наконец были признаны. В математическую науку вошли как неотъемлемая ее часть “группа Галуа”, “поле Галуа”, “теория Галуа”.

Сравнение событий, связанных с историями “отторжения” работ Карно и Галуа, показывает, несмотря на разницу в их возрасте и направлении научной деятельности, некие общие причины, лежащие в их основе. Несомненно, здесь сыграла свою роль и общая закономерность, связанная с трудностью восприятия новых идей, опередивших свое время. Однако представление о таких опережающих идеях гениальных людей далеко не всегда правомочно. Идеи и Карно, и Галуа закономерно следовали из логики развития науки своего времени; они не были какими-то внезапными озарениями, возникшими из ничего и стоящими в стороне от интересов современников.

Правильнее все же будет искать основную причину не в тех, кого не поняли, а в тех, кто не понял (или не хотел, или не смог понять). Нельзя, конечно, при этом сбрасывать со счетов особенности научного стиля и характера каждого из них — и Карно, и Галуа; однако главное — это состояние окружавшей их научной среды. Отношения С. Карно с научно-инженерной средой имеют одну специфическую особенность. В отличие от Э. Галуа, работавшего в четко определенной математической области, Карно одновременно охватил две (если не три) области: физику газов и паров, общую теорию тепловых двигателей (которой до него вообще не существовало) и, наконец, инженерно-экономические вопросы, связанные с разработкой тепловых двигателей. В результате он как в первой, так и в третьей области подошел к задачам с необычных для современников и трудно понимаемых позиций. О второй области и говорить не приходится: ее содержание было ново и непривычно для

¹⁾ Цит. по: *Дальма А.* Эварист Галуа, революционер и математик. М.: Наука, 1984.

²⁾ Обстоятельства смерти Галуа до сих пор не ясны. Есть основания полагать, что дело не обошлось без участия Королевской тайной полиции. Галуа, как и Карно, был непреклонным республиканцем.

всех специалистов, занимавшихся паровыми машинами, мысль которых не выходила дальше пространства между цилиндром и поршнем. Жирар в этом отношении, как видно из его доклада, был на голову выше остальных.

В теории газов Карно не претендовал на точные экспериментальные или теоретические результаты на уровне Гей-Люссака, Лапласа или Пуассона. Он не был и практиком — конструктором вроде Ньюкомена или Уатта — и не дал новых конструкций или методов их расчета. Если бы он посвятил себя одной из этих двух линий, вполне мог создать себе надежную репутацию и имя, а в завершение стать членом Академии наук. Но он выбрал собственный путь, малоинтересный для ученого мира, казавшийся надуманным, далеким и от серьезной теории, и от практики.

Французская академия, как и Политехническая школа, к середине 20-х годов XIX века была уже далеко не такой, как в начале века. После реставрации Бурбонов Политехническая школа, “рассадник республиканских и бонапартистских идей”, была в 1816 г. закрыта и, реорганизованная, вновь открыта в 1817 г. Реорганизация дошла до того, что ученикам Политехнической школы было запрещено в 1818 г. присутствовать на похоронах основателя школы академика Монжа.

Теперь политику в науке определяли не “безбожник” Г. Монж или его ученик и последователь Л. Карно, а такие люди, как набожный Коши или профессора, имена которых из-за их бесцветности вообще не вошли в историю науки. Вместо энтузиазма, активного интереса к новому и бескорыстного стремления поддержать талантливую молодежь и новые идеи в Академии наук воцарилось сознание собственной важности и значительности. Нельзя, конечно, отрицать серьезные научные достижения многих ведущих деятелей Академии того времени: их имена говорят сами за себя. Но все же радикально новое, что требовало активного и благожелательного внимания, коренного изменения устоявшихся представлений, вызывало реакцию отторжения. Все должно развиваться последовательно, аккуратно, без скачков, рывков и неясностей. Никаких революций ни на улицах, ни в науке!

Нужно еще отметить и воцарившийся в Академии наук корпоративный дух, опиравшийся на высокое общественное положение, прочность многолетних связей и богатство большинства ее членов. На правах младших партнеров сюда допускались и профессора Политехнической школы. Всякий стоявший и работавший вне этого замкнутого сообщества был “не свой”. С. Карно, несмотря на знаменитую фамилию, знакомство с некоторыми академиками (Прони, Дюпен, Жирар) и даже на то, что был выпускником Политехнической школы, в этот круг не входил и, что еще важнее, даже не стремился войти.

Естественно, что работы С. Карно и Галуа, непривычные и по концептуальным установкам, и по способу изложения, авторы которых, каждый по-своему, прибегали к “немыслимым” допущениям и логическим скачкам, опуская, казалось, необходимые доказательства, как это делал Галуа, или вводя необоснованные с первого взгляда допущения,

как поступал Карно, не могли быть поняты консервативными академиками.

Нельзя также упускать из виду и личность экспертов. Масштаб научного дарования Араго, считавшегося среди академиков самым крупным специалистом в этой области знаний ¹⁾, несравним с гениальной одаренностью С. Карно. Точно так же при всем уважении к заслугам Пуассона его как математика нельзя сопоставить с Галуа: это величины разных порядков.

Таким образом, с одной стороны, обстановка, сложившаяся к 20-м годам в ведущих научных учреждениях Франции, с другой — новизна содержания и формы работы С. Карно обусловили неизбежное ее “отторжение”. Отрицательную роль сыграли и некоторые личные качества Сади. Несомненно, что непонимание его труда, в который было вложено столько сил, явилось для него тяжелым ударом. Тем не менее он не прилагал никаких усилий, чтобы изменить ситуацию: не делал попыток завоевать себе сторонников среди именитых ученых, получить какую-либо поддержку вне академических кругов, организовать публичные лекции и дискуссии и т. д.

Среди заметок С. Карно сохранились правила поведения, например такие: *“Говори мало о том, что ты знаешь, и ничего о том, чего ты не знаешь”*. *“Когда дискуссия опускается до полемики, грани молчание... Не делай ничего, о чем бы не мог знать весь свет”*. В жизни он руководствовался именно этими высокими принципами, не позволявшими прилагать специальных усилий для пропаганды и тем более рекламирования своих идей и достижений. По-видимому, он знал стихи любимого его отцом поэта Саади:

Кто подлинно великим быть захочет,
Тот о величье вовсе не хлопчет.

Свои усилия Карно направил на то, чтобы понять оставшееся неясным ему самому и уже тогда предъявить полное решение задачи, не содержащее каких-либо неясностей и противоречий. Это были прежде всего неясности в теории теплоты, различие в понятиях “chaleur” — “тепло” и “calorique” — “теплород”, а также связанные с этим пробелы теории процессов в газах и парах.

Последние годы жизни. Болезнь и смерть

После выхода книги и связанных с ее представлением событий жизнь С. Карно заметно не изменилась. Независимо от научных и других занятий он по-прежнему добросовестно выполняет обязанности, регламентируемые военной службой. А поскольку эта служба была

¹⁾ Чтобы оценить уровень понимания проблем паровых машин, на котором находился Араго, достаточно ознакомиться с его (трижды издававшейся) книгой по паровым машинам, которая была переведена и на русский язык: это элементарно популярное сочинение без единой самостоятельной идеи.

связана в основном с топографией, Сади в совершенстве овладел ею и стал здесь ведущим специалистом. В октябре 1824 г. по заданию Генштаба он осуществляет инспекционную поездку в одном из военных округов; в 1825 г. проводит такую же работу в другом районе.

Рутинная военная служба в армии Бурбонов не могла, естественно, вдохновлять такого человека, как С. Карно, тем более что слава и репутация его отца и собственные республиканские убеждения Сади вызывали у начальства постоянную настороженность. Однако, несмотря на стремление посвятить себя продолжению научной работы, Карно не имел намерения отказаться в ближайшее время от военной службы и уйти в отставку в чине лейтенанта. Пребывание в Генеральном штабе давало возможность находиться в Париже со всеми его научными и культурными учреждениями и вместе с тем оставляло некоторый досуг и для собственной исследовательской работы. Однако вскоре появились трудности. Сохранившиеся документы дают возможность установить ход событий.

В декабре 1826 г. с подписанием приказа об организации королевского корпуса генерального штаба обстановка для многих офицеров генштаба меняется: режим службы делается более жестким и все офицеры, не прошедшие специальную школу, созданную в 1818 г., увольняются из генерального штаба. Сади, несмотря на то, что он, как выпускник Политехнической школы, не находился в числе тех, кто попадал под действие этого приказа, 31 декабря 1826 г. был отчислен и должен был либо согласиться на обычную службу в провинциальном гарнизоне (что лишило бы его возможности вести серьезную научную работы), либо уйти в отставку, не получив даже следующий чин. Карно в тот же день направляет рапорт военному министру, в котором откровенно излагает суть дела (характерно, что в нем нет просьбы об оставлении в Генеральном штабе): *“Согласно Вашему приказу я должен активно служить, но долгая свобода направила меня на другие дела, которые я не могу отбросить без основательной потери; поэтому прошу Ваше превосходительство предоставить мне отпуск, чтобы закончить дела...”*

Сади получил отпуск на 3 месяца с сохранением половинного оклада. 6 марта 1827 г. Карно снова обращается к министру: *“Я не успел закончить свои дела, которые требуют моего присутствия здесь. Прошу дать мне отпуск без указания срока или, если это невозможно, отпуск на 9–10 месяцев без оплаты. Я был вынужден обратиться для получения первого отпуска, поскольку этого требовали обстоятельства, настолько важные, что я принужден буду вообще уйти из армии, если не получу необходимого времени”*.

25 марта 1827 г. Карно добился восстановления в инженерных войсках с пребыванием в отпуске до 15 сентября 1827 г. без сохранения содержания. 27 сентября 1827 г. С. Карно получил чин капитана. По истечении отпуска он вернулся на службу с назначением в Бургундию, рядом с фамильным домом семьи Карно в Нолэ. Три дня в октябре он

провел вместе со своим другом Мишелем Шасле в Лионе. Однако служба в провинции продолжалась недолго. Министру, по-видимому, изрядно надоел капитан С. Карно, непрерывно требующий отпусков, грозящий отставкой. После очередного рапорта, подписанного: *“С глубоким уважением покорнейший слуга Вашего превосходительства С. Карно, капитан-инженер II ранга в отпуске, Париж, ул. Парк Ройяль, № 1”*, министр 19 мая 1828 г. принял отставку капитана С. Карно, но с условием, что он в течение 15 месяцев в школе Метца (той самой, которую Карно в свое время окончил) будет проводить уроки топографии.

На этом военная карьера С. Карно закончилась.

Потеря офицерского жалования существенно не повлияла на материальное положение С. Карно. Его дед по материнской линии Дюпон после смерти в 1807 г. оставил солидное наследство — около миллиона франков в виде земли, леса и фермы, одну треть которого получил Л. Карно. Часть этого наследства наряду с Ипполитом получил и Сади. Поэтому он мог жить независимо и заниматься тем, что было для него главным — научными исследованиями.

Этот период жизни С. Карно, возможно, был наиболее плодотворным. Он снова учится, собирая всю возможную информацию по физике, технике и экономике. Значительное время тратит на посещение промышленных предприятий и изучение организации и экономики различных производств. Результат — глубокие знания о состоянии промышленности и торговли в странах Европы ¹⁾.

В отличие от хода и обстоятельности военной службы С. Карно события его частной жизни и хода научной работы этого периода вплоть до 1832 г. не могут быть восстановлены достаточно полно по архивным документам: они практически отсутствуют. В распоряжении историков есть только немногочисленные материалы, отрывочные свидетельства и, наконец, очень краткие и не во всем достоверные воспоминания младшего брата — Ипполита.

После выхода в свет “Размышлений...” С. Карно продолжал внимательно следить за публикациями, относящимися к свойствам водяного пара, и работой комиссии, созданной еще в 1822 г. при Академии наук по предложению Жирара, в которую входили Лаплас, Прони, Ампер и Люпен (вместо которого в мае 1824 г. был введен Дюлонг). Распоряжением от 29 октября 1823 г. был утвержден регламент на паровые машины высокого давления, включавший правила техники безопасности, разработанные комиссией. Интересно, что в числе предохранительных устройств были пробки, плавящиеся при повышении температуры в котле выше допустимой.

По требованию инженеров-практиков комиссия разработала таблицу зависимости давления насыщенного пара от температуры (от 100

¹⁾ О научной работе С. Карно в период 1824–1832 гг. наиболее полное представление можно было бы получить, ознакомившись с его рукописным наследством. Однако пока доступна лишь небольшая часть оставшихся после его смерти записей.

до 173°C). В 1824 г. таблица была опубликована в “Annales de Chemie et de Physique”, затем распространена министерским циркуляром от 19 мая 1825 г.

После смерти Лапласа в 1827 г. на его место был назначен Араго. Араго и Дюлонг провели исследование упругости пара до давления 24 атм с экстраполяцией данных до 50 атм с помощью специально изготовленного котла, выдерживающего давление до 60 атм, и точного ртутного манометра, составленного из последовательно соединенных толстостенных двухметровых стеклянных труб с внутренним диаметром 5 мм. Результаты исследований были опубликованы в 1830 г. Еще до этого, 18 мая 1828 г., Дюлонг представил в Академию наук доклад “Исследования по удельной теплоемкости упругих тел”, который был опубликован в “Annales de Chemie et de Physique” в 1829 г. Интерес Карно к подобного рода физическим исследованиям не мог повлиять на его “привязанность” к тепловым машинам, инженерным задачам по их совершенствованию. Показательно, что на вопрос о его профессии (библиотекаря А. Fourcy, составлявшего “Историю Политехнической школы”, вышедшую в свет в сентябре 1828 г., Сади ответил, что он конструктор паровых машин. В какой степени такой ответ отражал его практическую деятельность в этой области и связи с промышленниками, судить трудно.

В собраниях Ассоциации политехников (L'Association Polytechnique), объединявшей выпускников Политехнической школы, Сади участвовал с августа 1830 г. Эта организация была создана в начале 1830 г. как дискуссионный клуб для обсуждения научно-технических проблем и для распространения знаний среди широкой публики, включая рабочих. В условиях революционного брожения она не могла оставаться в стороне от политики, поэтому на заседаниях часто возникали дискуссии из-за политических взглядов. Тем не менее число ее членов росло достаточно быстро (в октябре оно уже достигало 172) и они регулярно собирались. С 1832 г. в ассоциации председательствовал один из друзей Карно — Праслен, и было четыре вице-президента. Один из них — капитан Лараби, который впоследствии, в 1873 г., опубликовал труд под названием “Hommege á Lazare Carnot” (“Дань уважения Лазару Карно”). Годовой членский взнос для парижан составлял 15 франков. Собрания ассоциации проходили два раза в месяц. Обсуждались самые разные актуальные технические вопросы. Например, 16 мая 1832 г. был зачитан доклад “Заметки о преимуществах железных дорог перед другими путями сообщения”. Среди слушателей были и те ученики Политехнической школы, которые были исключены из нее в 1822 г. за левые политические убеждения. Было и много других “левых”, в частности физик и астроном Этьен Араго, брат академика Франсуа Араго. Сади вместе с девятью другими членами ассоциации устраивал бесплатные учебные занятия для парижских рабочих, что положило начало традиции, просуществовавшей многие годы.

Вместе с тем его научные занятия не прекращались и шли “широким фронтом”. Наряду с теорией теплоты и инженерными вопросами Карно весьма основательно занимался вопросами политической

экономии, о важности которых говорил ему еще отец. Сохранившийся фрагмент рукописи его экономической работы (разбор которой дается в следующем разделе) убедительно это доказывает.

Известно, что конец XVIII и начало XIX века характеризуются возросшим интересом к политической экономии (вспомним Онегина, который “читал Адама Смита и был глубокий эконом”). Лазар Карно изучал экономику более основательно, чем Онегин, и смотрел далеко вперед, оценивая возможности политической экономии, считая, что она должна развиваться по направлению к “социальной математике” — эконометрии. Возможности своего старшего сына в этой области он оценивал очень высоко. Ипполит Карно в своих воспоминаниях писал, что брат “необыкновенно глубоко проник в экономические науки”, правда, при этом оговариваясь, что “учеба в Политехнической школе воспитала у него несколько пренебрежительное отношение к философии” (здесь явно проскальзывает недовольство Ипполита скептическим отношением старшего брата к его философским увлечениям в стиле Сен-Симона). Известно, что С. Карно был слушателем лекций по экономике промышленности, которые читал в Консерватории искусств и ремесел известный экономист Ж. Б. Сэй — сторонник и популяризатор идей Адама Смита.

В августе 1831 г. С. Карно проводил экспериментальную работу по измерению свойств газов. Сохранившиеся заметки и документы не дают никакой информации о том, в какой лаборатории и с чьим участием она проводилась.

Бурные политические события — революция 1830 г. к последующие антиправительственные волнения в Париже в начале июня 1832 г. — воспринимались братьями Карно по-разному. Увлечение Ипполита утопическими идеями Сен-Симона. и его участие в уличных перестрелках и митингах старший брат не разделял. Это, естественно, не означало, что он был равнодушен ко всему, что происходило на парижских улицах. Известен случай, когда в июне 1832 г. С. Карно, проходя по улице, увидел скачущего на лошади пьяного офицера, размахивающего саблей и сбивающего с ног людей. Сади кинулся ему навстречу, опрокинул и сбросил в канаву. Такая храбрость, темперамент и отвращение ко всякой несправедливости уживались в нем с умением трезво оценивать достаточно сложную революционную ситуацию. Он был глубоким политиком, понимавшим, что замена Карла X Филиппом Орлеанским мало что изменит по существу, заменив лишь господство одной группы правящего класса на другую. О его скептическом отношении к политическим деятелям, всплывавшим на поверхность в то время, говорит запись в дневнике: *“По-видимому, все честные люди находятся на каторге. Всюду встречаешь лишь мошенников”*. Карно был убежден, что только коренные изменения политической системы в республиканском духе могут дать народу Франции реальные блага.

Друзья С. Карно предполагали, что Луи-Филипп, сменивший на троне после революции 1830 г. реакционного Карла X, использует Сади в своем правительстве: его выдающиеся способности, глубокое знание экономических вопросов (да и принадлежность к знаменитой фамилии)

могли бы найти полезное применение. Но король и его окружение, зная республиканские убеждения С. Карно, не пошли на такое сотрудничество.

Между тем Сади продолжал упорно работать. Он ничего не публиковал, оставляя свои мысли в рукописях, с тем чтобы решить неясные до конца вопросы, провести необходимые и уже продуманные эксперименты. Но он не успел сделать всего, что наметил.

Не оставляя Сади и своего постоянного увлечения музыкой, посещал концерты, в свободные минуты играл на виолончели. В апреле 1832 г. в журнале “Revue Encyclopedique”¹⁾ появилась рецензия на работу “Принципы гармонии и мелодии”, незадолго до этого представленную Академии наук. Работа, основанная на теории колебаний, была написана генералом инженерных войск в отставке бароном Блейном, который в свое время был знаком с Лазаром Карно. Рецензия, выдержанная в благожелательном тоне, подписана инициалами S. C. По стилю рецензии можно предположить, что она принадлежит перу Сади Карно.

Последний год жизни С. Карно был трудным: его преследовали болезни. С детства он был относительно слабого телосложения, но много занимаясь физическими упражнениями, укрепил свое здоровье. Напряженная работа, жизненные трудности, непризнание дали о себе знать. В это время он много размышляет о религии. Вольтера с его резким и злым умом он не любил. Наиболее близок ему был Паскаль. Но официальной религии С. Карно не признавал. Он записывает в дневнике: *“По доктрине церкви бог похож на сфинкса, предлагающего загадки и пожирющего тех, кто не может их разгадать. Церковь приписывает богу все человеческие страсти — гнев, мстительность, деспотизм, пристрастие, лень.”*

Сохранился портрет Сади Карно, написанный за два года до его смерти художником Деспуа. Сади 34 года. Перед нами усталый человек, погруженный в глубокое раздумье. В это время у Сади появились признаки душевной депрессии. Еще и ноябре-декабре 1830 г. ему пришлось пройти курс лечения в “Доме здоровья” доктора Э. Эскироля²⁾, расположенном в обширном парке парижского пригорода Иври на Сене. Это было привилегированное лечебное заведение для больных, страдающих душевными расстройствами. Оно предназначалось для состоятельной клиентуры; пациенты жили в специально оборудованных отдельных одноэтажных зданиях, расположенных в обширном парке. В декабре Сади выздоровел, закончил лечение и выписался из больницы.

¹⁾ Одним из издателей этого журнала был Ипполит Карно.

²⁾ Доктор Эскироль был крупным специалистом в своей области. Ему принадлежит двухтомный труд “О душевных заболеваниях, рассматриваемых с медицинской, гигиенической и судебно-медицинской точек зрения”, изданный в Париже в 1838 г.

История последней болезни и смерти С. Карно недостаточно ясна (в последнее время выявлены некоторые документы, позволяющие частично восстановить связанные с этим события).

Болезнь началась где-то между серединой мая и началом июня 1832 г. Известно, что 16 мая Сади присутствовал на очередном собрании Политехнической ассоциации, где А. Пердонне¹⁾ читал “Сообщение о преимуществах железных дорог перед другими средствами сообщения”. Но на следующем заседании, состоявшемся 20 июня, на котором Ламе и Клапейрон делали доклад “О железных дорогах с точки зрения обороны территории страны”, его уже не было. Личное знакомство Э. Клапейрона и С. Карно, которое могло бы сыграть существенную роль в истории термодинамики, не состоялось...

Однако через месяц Сади почувствовал себя значительно лучше: усиленное лечение дало положительный результат. Сразу после выздоровления (24 июля) он пишет одному из своих друзей: *“Мое опоздание на этот раз находит оправдание. Я болел все время и очень утомительно. У меня началось воспаление горла, связанное со скарлатиной (можете представить, как это гадко). Я провел 12 дней в постели без сна, без пищи, без какого-либо занятия, развлекаясь с пиявками, клизмами и другими подобными играми этой лавки. Это маленькое увеселение еще не закончилось, так как я чувствую себя еще очень слабым.”*

Это письмо показывает не только мучения, которые претерпел больной от “игр” тогдашней медицины (“этой лавки”), но и мужественный юмор, помогавший Сади переносить их.

Но надежды на выздоровление не оправдались. Через некоторое время началась “мозговая лихорадка”, бред, нервное возбуждение, и 3 августа Сади вновь поместили в лечебницу доктора Эскироля. На этот раз лечение не дало положительного результата.

Сохранился документ, как бы история болезни С. Карно: “№ 171. Г-н Карно, Лазар Сади, 36 [лет], бывший военный инженер [родившийся] в Париже, Сена [адрес] Ул. Эст № 5, его брат — ул. Ст. Пэр № 26, мания [поступивший] 3 августа 1832 г., выздоровев от своей мании, умер 24 августа 1832 г. холеры²⁾. Эта запись нуждается в некоторых комментариях.

Некоторые авторы (например, А. Virembaut) выражают сомнения в правильности последнего диагноза. Выдвигается версия, что в таком

¹⁾ Он был исключен из Политехнической школы 20 декабря 1822 г. вместе с несколькими другими ее студентами, как “опасный карбонарий”; поддерживал дружеские связи с С. Карно.

²⁾ Эпидемия холеры приняла в те годы огромные размеры и вызвала гибель миллионов людей. Она зародилась в 1817 г. в долине Ганга. Через Китай в 1830 г. проникла в Европейскую Россию (с ней были связаны холерные бунты, а также карантин, задержавший Пушкина и Болдине). В 1831 г. холера достигла средней Европы — Австрии и Германии (от нее умер Гегель). В 1832 г. она появилась во Франции, в Париже. В Иври в 1832 г. от холеры умерли 120 человек.



Рис. 20. Портрет С. Карно работы Деспуа, написанный в 1830 г.

объяснении причины смерти Сади был заинтересован Ипполит: оберегая честь семьи, он хотел скрыть, что брат был пациентом больницы для душевнобольных и умер в Иври, а не дома в Париже. По этой версии, смерть С. Карно наступила не от холеры, а явилась следствием предыдущих болезней, осложнившихся острым желудочным заболеванием (следует иметь в виду, что в то время многие желудочные заболевания рассматривались как различные формы холеры).

Действительно, во всех дальнейших документах, начиная с некролога (текст которого приведен ниже), тот факт, что С. Карно умер в Иври в больнице д-ра Эскироля, замалчивается. Говорится только о холере. Сам по себе этот факт не имел бы существенного значения для истории науки; в конце концов Ипполит Карно мог по-своему понимать честь семьи. Однако с диагнозом и местом смерти была связана судьба обширного рукописного наследия С. Карно; если бы Сади умер от холеры в Париже, в своей квартире, то последующее исчезновение основной части его бумаг (рукописей научного содержания, записных книжек, юридических документов, писем и т. д.) можно было объяснить последствиями принятого в то время способа дезинфекции — обработки помещения известью и сожжения всего, что в нем было ¹⁾. Смерть вне дома, в больнице, находящейся далеко в пригороде, не требовала таких мер. Следовательно, все документы С. Карно должны были сохраниться. Однако большая их часть исчезла, и единственный наследник Сади — его брат Ипполит — не дал этому никаких объяснений.

Кончина Сади была в этот же день 24 августа зарегистрирована в мэрии Иври: "...Г. Сади Карно, родившийся в Париже XI округа 1 июня 1796 г. сын Лазара Николая Маргерита Карно, генерал-лейтенанта ... и Мари Жаклин Софи Жозеф Дюпон, его супруги ... бывший капитан инженерных войск, холостой, проживавший в Париже по улице Эст № 5 ²⁾, скончался в этой коммуне по ул. Сен № 7 сегодня в 7 часов утра, в чем и составлен настоящий акт..." Столь же быстро было найдено место на кладбище. В архивах коммуны Иври сохранился документ под названием "Постоянное место на кладбище в Иври": 24 августа 1832 г. экономом больницы доктора Эскироля после заявления о смерти Сади передает в мэрию Иври, согласно обычаю в данных обстоятельствах, просьбу о постоянном месте на кладбище, написанную его рукой, по следующей форме:

"Господину мэру Иври.

Жан Этъен Фрюманс Митивье, доктор медицины Парижского факультета, имеет честь просить г-на мэра соблагovolить предоставить постоянное место площадью в три метра на кладбище коммуны Иври, чтобы основать там вечное захоронение г-на [зачеркнуто: Лазар] Сади Карно, рожденного в Париже, в возрасте 36 лет, холостого, умершего

¹⁾ Такая версия исчезновения большей части архива С. Карно еще встречается в научной и учебной литературе.

²⁾ Сейчас эта улица не существует.

в названной коммуне Иври по ул. Сены в № 7 сегодня в 7 часов утра.
Иври, 24 августа 1832 г.

Постоянное место предоставлено в тот же день за № 33, за плату в размере 187,50 франка, актом мэра”.

Похороны (гражданские) состоялись на следующий день и не привлекли к себе большого внимания. Какой знак был установлен на могиле в то время — осталось неизвестным; только в 1923 г., когда отмечалось столетие со дня смерти Л. Карно, один из его потомков установил небольшую стелу на могиле С. Карно на старом кладбище Иври. На ней высечена надпись: “Николя Леонард Сади Карно” — и крест.

Некролог “Биографическая справка о Сади Карно” был опубликован в августе 1832 г. в журнале “Revue Encyclopedique” за подписью Клода Пьера Робелена, друга и соученика Сади по Политехнической школе. По существу, это была первая и в течение нескольких последующих десятилетий единственная публикация, посвященная биографии Сади Карно. Несмотря на краткость, в ней содержится ценная информация о нем, и не только биографического характера: ее содержание гораздо шире.

“Сади Карно, старший сын человека, способствовавшего победе Франции в 1794 г., только что скончался от эпидемии в возрасте около 36 лет.

Чтобы дать представление о его слишком короткой жизни тем, кто знает о ней лишь поверхностно, можно сказать, что он был одним из лучших учеников Политехнической школы, основанной его отцом, что он был военным инженером, а затем штабным офицером и, рано выйдя и отставку, занимался изучением точных наук и политической экономии.

Для тех же, кто был близок с ним, Сади Карно проявил себя в других масштабах; им надлежит дать ему подлинную оценку и определить то место, которое он должен был занять в близком будущем.

От своего отца он получил не только известное имя; он унаследовал от него еще широту взглядов, способность к обобщениям, точность ума, которая позволяет почти инстинктивно определять следствия какого-либо принципа или события, и, наконец, силу воли, способную преодолевать препятствия. Ему не удалось занять положение, которое обнаружил бы эти редкие достоинства.

Он окончил Политехническую школу во время первой революции и принимал участие в сражениях у стен осажденного Парижа, затем он выбрал службу военного инженера, пойдя по стопам отца. Но при Бурбонах должность военного инженера была бесперспективна и, удерживая его далеко от столицы, могла лишь сковать развитие его высоких способностей.

Во время образования корпуса Генерального штаба он вошел в его состав, где, казалось, его ожидало более широкое поле деятельности. Это была ошибка, по крайней мере по отношению к нему; его имя вызывало недоверие, и он постоянно был под подозрением.

Он вышел в отставку, чтобы полностью отдаться изучению наук; счастливая организация его ума позволила ему охватить многие из них, но он уделял особое внимание физическим наукам и политической экономике. Он приобрел глубокое знание об устройстве различных стран Европы, их торговых и промышленных отношениях и, наконец, обо всех данных, определяющих их политические отношения.

Потрясенный огромным преимуществом, которое могло дать Франции применение тепла в качестве движущей силы, он пытался определить четкие правила создания паровых машин (машин, работающих на силе огня), разработка которых находилась еще в начальной стадии. В замечательной работе, он создал теорию движущей силы огня. К сожалению, эта работа, недостаточно развернутая и предполагавшая наличие обширных познаний у читателя, оказалась доступной слишком малому числу читателей и не смогла быть использована должным образом. Июльская революция застала его во время разнообразной научной работы, с которой он сочетал занятия искусством, и в особенности музыкой. Можно было бы предположить, что он будет призван для участия в создании нового политического устройства, но сегодня стало понятным, почему, будучи врагом всякой интриги, он остался в безвестности. Мелочные придирки по незначительному поводу в связи с его поступлением в артиллерийскую роту национальной гвардии говорят о том, что с самого начала своего существования новая власть не осталась чуждой подозрительности Реставрации.

Более того, Сади Карно не заблуждался по поводу ценности больших обещаний, сделанных стране; дело не в том, что он не верил в их искренность, но он понимал невозможность их осуществления составом нового правительства.

Убежденный к тому же, что политические изменения могут быть лишь результатом развития умов и не могут быть проведены с пользой путем рассчитанных мероприятий, он остался чуждым политической деятельности.

В августе нынешнего года он занимался исследованиями физических свойств газов и уже достиг значительных результатов, когда заболел скарлатиной, которая, будучи плохо залеченной, перешла в воспаление мозга. Эта последняя болезнь уже уступала усилиям врачей, и Сади Карно собирался восстановить в деревне свои истощенные силы, когда он был поражен приступом холеры, которая унесла его за 15 часов, несмотря на помощь нескольких докторов, несмотря на самоотверженный уход со стороны брата и нескольких друзей.

Траур и глубокие сожаления знавших его ясно показывают, что качества сердца Сади Карно ни в чем не уступали качествам ума. Он оставил многочисленные рукописи, являющиеся сегодня собственностью его брата, но г. Ипполит Карно поймет, конечно, что страна вправе требовать публикации ценных документов, которые почти целиком связаны с процветанием Франции.

Робелен

Выпускник Политехнической школы.”

В этом документе обращают на себя внимание три аспекта, имеющие существенное значение для оценки обстановки вокруг С. Карно в последние годы его жизни и для дальнейшего анализа его научного наследства.

Прежде всего, он показывает, что и среди современников С. Карно были люди, понимавшие, хотя и не до конца (что вполне естественно — для этого необходима временная дистанция), масштаб его личности, ценности того, что он успел сделать в науке, и то, что он мог совершить в будущем как в науке, так и на поприще общественной деятельности.

Во-вторых, публикация дает много ценных биографических сведений о Сади Карно. Среди них особого внимания заслуживает характеристика условий военной службы, краткий, но содержательный анализ его интересов в области политической экономии и международной политики, а также отношения к политическим проблемам, особенно к революции 1830 г. и последующим событиям. Здесь, по-видимому, лежат причины его серьезных политических разногласий с братом Ипполитом, принявшим режим Луи-Филиппа и сотрудничавшим (хотя с некоторой оппозиционностью) с ним.

Наконец, в этом документе содержится недвусмысленное, хотя и выдержанное в дипломатическом тоне требование опубликовать оставшиеся после смерти С. Карно рукописи. Очевидно, что оно относилось к Ипполиту — единственному наследнику всего, что принадлежало брату. Тон этого требования и доводы, приводимые в его обоснование, показывают, что его автор (или авторы) имели основание испытывать тревогу по этому поводу.

К сожалению, эти опасения оправдались — основная часть рукописей и других документов, оставленных Сади Карно, бесследно исчезла, и лишь небольшая часть была опубликована с большим опозданием — через несколько десятилетий.

Рукописи С. Карно.

“Заметки по математике, физике и другим предметам”.

Открытие и вычисление механического эквивалента теплоты.

Фрагмент работы по экономике

Ипполит Карно, как единственный наследник Сади, казалось, должен был позаботиться об оставшихся после брата бумагах, письменных документах, которые тот тщательно сохранял. Нужно было разобраться в них и представлявшие интерес опубликовать (как рекомендовал автор некролога). К сожалению, И. Карно поступил иначе. Будучи человеком практичным, он занялся наследством, имевшим в его глазах истинную ценность.

По французским законам для получения наследства следовало официально заявить об этом не позже чем через 6 месяцев после кончины лица, его оставившего. Ипполит не торопился с заявлением

и передал его 20 февраля 1833 г. — за четыре дня до окончания срока, когда подробности смерти Сади стали забываться. В этом документе упоминается лишь движимое имущество, оцененное в 1550 франков и 16 акций Французского банка на сумму 26 480 франков. Больше ни о каком имуществе там сведений нет, за исключением домовладений, о которых сказано, что “будет предъявлена декларация по месту их расположения”.

Вообще к финансовым аспектам наследования Ипполит отнесся очень внимательно. Через некоторое время ему удалось сделать почти невозможное — получить за Сади (и, естественно, за себя) задержанную после Реставрации пенсию, которую Наполеон установил в 1809 г. Лазару Карно. Это подтверждалось соответствующим документом.

“Заявление о правах наследования от 19 мая 1836 г. Г-н Лазар Ипполит Карно, домовладелец, проживающий по ул. Вожирар в д. № 41, действуя как единственный наследник г. Сади Карно, его брата, умершего по ул. Эст в № 5 бис, 24 августа 1832 г., не оставив ни родителей, ни потомков, сделал следующее заявление:

Декретом от 23 августа 1809 г. была установлена пенсия в 10 000 франков генералу Карно, отцу заявителя, в награду за его прежние заслуги; этот генерал был изгнан, и к нему был применен закон от 12 января 1816 г., который лишал изгнанников предоставленных им бесплатно пенсий; он умер в Магдебурге 3 августа 1823 г., не получая пенсии со времени принятия этого закона.

По заявлению заявителя Государственный совет признал, что эта пенсия была предоставлена за плату и была отменена в результате неправильного применения закона от 1816 г. Приказ короля от 28 сентября 1834 г. направляет г. Карно к министру финансов, чтобы дать ход его просьбе в соответствии с законом.

Поскольку этот последний заявил новые претензии, Государственный совет принял уведомление от 21 сентября 1835 г., утвержденное королем 27-го того же месяца. Задержанная пенсия вышеназванного генерала Карно, установленная в сумме 70 014,43 франка, входит в состав наследства, из которого 1/2 относится к наследству Сади Карно, об имуществе которого было заявлено 20 февраля 1833 г. под номером 200 в сумме 35 007,22 франка.

Представляющий перед нотариусом подтверждает искренность и подлинность своей декларации в соответствии с законом.

Подписано по получении и по прочтении.

И. Карно”

В этот документе обращают на себя внимание два обстоятельства.

Первое состоит в том, что здесь уже однозначно указывается, что С. Карно умер в Париже, что вполне устраивает Ипполита.

Второе — это дважды проявленная поддержкой королем просьбы И. Карно о восстановлении пенсии, пожалованной Наполеоном крамольному и хорошо известному всем Л. Карно, изгнанному Бурбонами из пределов Франции, и передача накопившейся суммы Ипполиту. Без поддержки короля такое пройти никак не могло, но король помнил, что,

несмотря на свой революционный пыл, Ипполит проявил лояльность по отношению к нему во время бурных событий 1830 г.

Не только финансовые дела, но и политическая карьера Ипполита развивалась вполне успешно: после 1835 г. она стала “набирать обороты”. Постепенно он становится весьма заметной фигурой на политической сцене страны. В марте 1839 г. избирается в Палату депутатов, где занимает умеренно левые позиции; в 1848 г. во Временном правительстве он был министром просвещения и религии и выдвинул прогрессивный проект о всеобщем начальном образовании. После поражения революции уходит в отставку, но затем вновь возвращается к политической деятельности: в 1864 г. входит в Законодательный корпус. После 1870 г. (с 1871 г.) снова становится депутатом, а с 1875 г. — пожизненным сенатором. Умер И. Карно в 1888 г., прожив долгую жизнь.

Ипполит Карно был несомненно способным человеком: он проявил себя и как политический деятель, и как литератор. Написанная им краткая “История французской революции” живо, с достаточно объективных позиций излагает события этого бурного отрезка истории Франции. В оценке ситуаций и действующих лиц чувствуется влияние рассказов Лазара Карно — непосредственного участника и одного из ведущих политических деятелей того периода. Ему посвящен и другой труд Ипполита — двухтомные “Воспоминания о Л. Карно, написанные его сыном”, выпущенные в 1861–1863 гг. Однако при всем этом он был существенно менее значительной личностью, чем его брат или отец. В частности, это сказалось и на отношении к памяти и научному наследству (в том числе и рукописям С. Карно).

После смерти старшего брата в течение 46 лет И. Карно хранил полное молчание о документах, оставшихся в его руках. Большая их часть бесследно исчезла. Утверждать с уверенностью, что он специально уничтожил почти весь архив Сади Карно, по-видимому, нельзя, поскольку непосредственных доказательств этого нет — он мог быть просто потерян. Но в любом случае его вина перед потомками неизгладима¹⁾.

Можно лишь предполагать, что привело к исчезновению большей части рукописей С. Карно. Если говорить о рукописях, содержащих материалы политического и экономического характера, то несомненно, что их радикализм, отдававший революционным духом “великого Карно”, не соответствовал взглядам и общественному положению Ипполита: их публикация могла повредить его карьере, как политика умеренного направления. Что касается рукописей физико-технического содержания, то Ипполит, не имевший естественно-технического образования, просто не понимал их ценности. Тем более он не смог должным образом

¹⁾ Альфред Галуа в аналогичной ситуации сделал все, что было возможно, для публикации оставшихся после смерти брата работ — от первого до последнего листка. Он не мог глубоко понимать существо работ Эвариста, но верил в его гений.

оценить того влияния, которое они могли оказать на науку. Он не догадался дать их на просмотр какому-либо подготовленному специалисту, например кому-нибудь из коллег С. Карно по Политехнической школе.

Во второй половине 30-х годов и особенно в 40–50-е годы книга Сади Карно благодаря Клапейрону стала широко известной, а слава его имени перешагнула границы Франции. В 1845 г. У. Томсон, будучи в Париже, тщетно искал “Размышления...” С. Карно у книготорговцев и пытался обнаружить какие-либо другие следы его работ, а Р. Клаузиус приступил к развитию его идей. Но даже тогда Ипполит не предпринял никаких действий, чтобы “выпустить на волю” хотя бы сохранившуюся часть рукописного наследства брата. Однако тут в дело вмешались сыновья Ипполита.

Старший сын Ипполита Карно — Мари Франсуа Сади, родившийся в 1837 г. и получивший это имя в честь своего дяди, продолжил семейную (даже обе семейные) традиции — и инженерную, и политическую. Закончив Политехническую школу, он стал известным инженером, принимавшим участие во многих разработках, относящихся к дорожному строительству (в частности, по его проекту построен мост через Рону). Подобно своему знаменитому деду, он проявил себя и на военно-организационном поприще, возглавив (в качестве комиссара) установление в Нормандии республиканского строя после падения империи Наполеона III и защиту от немецких войск во время франко-прусской войны. С 1871 г. он депутат Национального собрания, в 1880–1882 гг. — министр общественных работ, в 1885 г. — министр финансов, а с 1887 г. — президент Франции.

Современники, в том числе и его политические противники, отмечали, что он отличался прямоотой характера, неподкупностью и отсутствием мелочного честолюбия, был сторонником франко-русского союза и пользовался большой популярностью и в России. Как президент он 10 июля 1889 г. официально открыл одно из интереснейших инженерных сооружений XIX века — Эйфелеву башню.

Он был убит итальянским анархистом Казерио в Лионе в 1894 г. По предложению Н. А. Белелюбского ¹⁾ на его гробницу был возложен серебряный венок с надписью: “Президенту Французской республики, инженеру путей сообщения от русских инженеров”. В сопроводительном письме С. Карно был назван “великим гражданином”. Его именем назван один из бульваров в Парижском районе Иври (иногда ошибочно полагают, что бульвар Сади Карно назван в честь основателя термодинамики — это не так).

Младший сын Ипполита — Мари Адольф Карно — родился в 1839 г., тоже окончил Политехническую школу (пятым из своего выпуска, в отличие от Сади-младшего, будущего президента, окончившего ее седьмым). Он выбрал горное дело. Политикой он специально не занимался,

¹⁾ Николай Аполлонович Белелюбский (1845–1922) — известный русский инженер-мостостроитель; по его проектам построены, в частности мосты через Волгу у Сызрани и через Днепр у Днепропетровска.

а сосредоточил силы на науке и сделался известным минералогом и химиком. В 1895 г. был избран в Академию наук. Его работы по соединениям ванадия дали основание назвать минерал, содержащий соединения ванадия, по его имени — карнолит.

Ипполит, естественно, рассказывал сыновьям о семье Карно; больше всего, конечно, о Лазаре, но много и о Сади, при этом не упоминая об оставленных им рукописях. Они оба в отличие от отца были людьми технически образованными и знали содержание книги Сади Карно и что началось им дело развивается в Германии и Англии (это все происходило уже в 60-е годы). Под их влиянием Ипполит, наконец, осознал, что представлял собой его брат, тем более что интерес и к его биографии начали проявлять во многих странах. Туринская академия наук заслушала в январе 1869 г. доклад П. Сен-Робера “Сади Карно, биографическая справка” (представленный Мишелем Шалем, соучеником Сади по Политехнической школе), опубликованный еще в 1868 г. Часть этого доклада (с. 153–157) была написана Сади-младшим по воспоминаниям отца. Оживлению интереса к Сади Карно и его работе способствовало также стремление французских физиков после военного поражения 1870 г. подчеркнуть значение французской науки; это заставило их “мобилизовать все ресурсы”, вспомнить наконец и о Сади Карно. “Научные анналы” Высшей нормальной школы в 1872 г. (через 50 лет после смерти автора) переиздают “Размышления о движущей силе огня...”. Второе издание книги вышло без каких-либо контактов издателя с Ипполитом Карно и без его ведома.

Прошло еще несколько лет. Младший сын Ипполита Адольф узнал о том, что фрагменты рукописей Сади сохранились. Только тогда наконец Ипполит извлек из небытия некоторые рукописи Сади. Адольф ознакомился с ними и понял, какой уникальный материал они содержат. Под влиянием сыновей Ипполит принял решение передать гласности эти фрагменты и передал их в Академию наук для публикации и последующего хранения. Он направил подробное письмо президенту и членам Академии наук с характеристикой записок брата. Было подготовлено новое, третье издание “Размышлений о движущей силе огня...” с приложением этого письма, воспоминаниями о Сади и его неопубликованными записками 1824–1832 гг. Это издание вышло в Париже в 1878 г. Очевидно, что его появление обусловлено в значительной степени давлением на Ипполита Карно его сыновей — Сади и Адольфа.

Письмо И. Карно интересно прежде всего потому, что показывает, насколько изменилась обстановка в той области науки, начало которой положил его брат. Надо полагать, что основным автором письма был Адольф Карно: чувствуется рука профессионала, детально знакомого как с историей, так и с существом дела. Приведем наиболее интересные фрагменты этого письма:

“Господин президент!

Имя моего старшего брата, Сади Карно, хорошо известно Академии; множество раз его “Размышления о движущей силе огня” были использованы новой наукой, термодинамикой. Мемуар, единственное

законченное автором произведение, получил лишь очень ограниченное распространение, и мало лиц знакомо с его текстом.”

Затем И. Карно пишет, что в новое издание, выпущенное с его помощью, включены биографические заметки о С. Карно, “жизнь которого так же малоизвестна, как и его труды”.

Далее идет самое главное:

“Я прилагаю к ним текст нескольких неизданных фрагментов, которые если и не принесут науке новых результатов, то будут свидетельством того, что Сади Карно с достаточно большой определенностью предвидел выводы, сделанные гораздо позже из его идей.

Их раскрытие — это справедливый акт по отношению к автору. И чтобы не осталось на этот счет никаких сомнений, я имею честь направить Вам также рукопись моего брата с просьбой оказать любезность отправить ее на хранение в Архив Института, откуда ее всегда можно будет извлечь.

Позвольте мне, господин президент, присовокупить к этому посланию оригинал рукописи “Размышлений о движущей силе огня”. Быть может Академия сочтет ее достойной той же чести: отправная точка науки будет небезынтересна Вам, тем более что она способствовала, как и механическая теория тепла, прогрессу всех физических наук.”

Далее идет описание событий в науке, связанных с развитием термодинамики после выхода книги С. Карно; упомянуты работы В. Клапейрона, Р. Майера и Дж. Джоуля. Затем цитируются те места из записок Карно, где он предлагает заменить вещественную теорию тепла на другую гипотезу, по которой тепло было бы результатом колебательного движения молекул. *“Тепло, — утверждает он, — есть результат движения. Тогда очевидно, что оно может производиться поглощением движущей силы и что оно может производить эту силу.”*

“Сади Карно, — написано далее, — не ограничивается констатацией превращения тепла в работу: он настаивает вновь и вновь на эквивалентности этих двух количеств.”

В письме указывается, что в записках Карно приведена величина полученного им значения механического эквивалента тепла: 370 килограммометра на килокалорию, что более близко, чем у Р. Майера (365), к точной цифре, полученной затем Джоулем, — 427 кгм/ккал.

Заканчивается письмо так:

“...Сади Карно не только пришел к точному представлению об эквивалентности тепла и движущей силы, но и ему удалось представить эту эквивалентность численной величиной, и эта величина была даже более близка к истине, чем у Майера.

Итак, мы имеем основание утверждать, что если в своем первом труде, опубликованном в 1824 г., он сформулировал принцип, которому

было присвоено его имя, то в своих последующих работах ему удалось открыть принцип эквивалентности, который вместе с первым образует фундаментальную базу термодинамики.

Преждевременная смерть не позволила ему опубликовать этот закон ... и провести основательные опыты, чтобы сделать сообщение научному миру.

Примите, мсье Президент, уверения в моем самом глубоком уважении.

И. Карно

Испытывал ли Ипполит Карно угрызения совести, что долгие годы скрывал документы брата, не смог оценить его гениальность, — остается неизвестным. Он не мог теперь не понять, какой ущерб его действия (или бездействие) нанесли науке, не говоря уже об утере приоритета С. Карно в открытии механического эквивалента теплоты. Если бы это сенсационное сообщение появилось хотя бы к 1840 г., возможно, оно облегчило восприятие работ Р. Майера и несомненно лишило бы его части приоритета в установлении первого начала термодинамики. Здесь нужно говорить именно о *части* приоритета, поскольку Р. Майер первым распространил закон сохранения энергии на химические и биологические процессы. Своевременное опубликование “Записок” Карно ускорило бы развитие термодинамики, “спрямив” ее пути. Однако история науки (как и история вообще) часто делает, по словам Ф. Энгельса, такие скачки и зигзаги, которые вызывают изумление и современников, и в еще большей степени потомков.

Так или иначе, но публикация И. Карно однозначно установила приоритет его брата в открытии и количественном установлении закона эквивалентности тепла и работы — основы первого начала термодинамики. Естественно, это ни в коей мере не уменьшает великих заслуг и Майера, и Джоуля. Однако цепь событий сложилась иначе, и открытие С. Карно, сделанное по крайней мере за десятилетие до Майера и скрытое в сейфе Ипполита Карно, никак не повлияло на развитие термодинамики. К сожалению, в большинстве учебников термодинамики имя С. Карно в связи с первым началом термодинамики не упоминается, что несправедливо: работа С. Карно и в этой, менее известной части должна быть отмечена.

Записи С. Карно были систематизированы и расположены в определенной логической последовательности Раво (С. Raveau) в 1927 г. Исследователи полагают, что большая их часть написана не позже 1825 г., а некоторые еще во время создания “Размышлений о движущей силе огня...”. Их содержание показывает, над чем и как работал Карно в 1824–1832 гг., и позволяет полнее представить его дарование, стиль мышления и возникновение новых идей. Кроме того, они позволяют по-новому подойти к оценке некоторых мест “Размышлений о движущей силе огня...”.

“Записки” С. Карно содержат разнообразный материал: почти законченные фрагменты будущих публикаций, ссылки, разрозненные

данные, соображения о будущих экспериментах и их возможных результатах. Ниже приведены наиболее значительные фрагменты из “Записок” С. Карно. Следует отметить, что, несмотря на фрагментарность, “Записки”, по существу, объединены одной общей темой и не менее монолитны, чем знаменитая книга Карно.

Действительно, “Размышления...” включают рассмотрение широко-го круга вопросов как физического, так и инженерного плана, вплоть до технико-экономических. Это естественно, поскольку новые положения, выдвигавшиеся автором, требовали как анализа исходной информации, так и приложения их к задачам дальнейшей разработки тепловых двигателей. Карно блестяще справился с этой задачей. Если же ограничить рассмотрение теорией, то основное достижение книги — разработка основ, говоря языком современных терминов, второго начала термодинамики.

Известно, что основное противоречие, с которым столкнулся Карно, было несоответствие вещественной теории тепла ряду наблюдаемых фактов и невозможность вследствие этого дать законченную и строгую общую теорию тепловых двигателей. Два замечательных примечания Карно в его книге о несовершенстве современной теории тепла показывают, что он все это четко понимал, хотя и не углублялся тогда в анализ задачи. Он блестяще обошел все трудности, разграничив понятия “chaleur” и “calorique”, используя второе как характеристику, обладающую свойством сохранения. Первое — “chaleur” (теплота) — он оставил для дальнейшего изучения.

Ознакомление с “Записками” Карно показывает, что он решал и в конце концов решил эту задачу — анализ природы тепла и связь его с “движущей силой”, т. е. работой, и, несмотря на разнообразие содержания, “Записки” четко посвящены одной теме. Это как бы основа следующей за “Размышлениями...” работы, посвященной обоснованию первого начала термодинамики. Сопоставление текстов “Размышлений...” и “Записок” показывает, что С. Карно поступил здесь как квалифицированный военный специалист: он не остановил наступление перед крепостью для ее немедленного штурма, а обошел ее, чтобы взять позже. Такой “крепостью” и была теория тепла. Из “Записок” видно, как постепенно посредством наблюдений и экспериментальных данных у Карно укреплялось убеждение в несостоятельности вещественной теории тепла и необходимости ее замены на механическую. Затем возникло представление об эквивалентности тепла и работы. Оно привело его к необходимости выбора комплекса экспериментов, которые должны были подтвердить теорию, и в конце концов к количественному определению этого эквивалента. Важно отметить, что при этом все основные положения, установленные ранее в “Размышлениях...”, оставались неизбылемыми.

Проанализируем текст фрагментов “Записок”, расположив основные материалы в изложенной выше последовательности.

Фрагмент 1

«*Journal de Physique*»: эксперименты, относящиеся к теплу, выделяемому при трении:

пластины льда, трущиеся одна об другую — Дэви;
воздушный насос с малым отверстием в поршне или по периферии;
эксперимент Румфорда со сверлением металла,ковка свинца, олова, меди, сверление дерева;
впуск воздуха в вакуум;
то же самое в более или менее разреженный воздух;
впуск воздуха в ресивер пневматической машины со звенящим колоколом.

Эти эксперименты могли бы позволить нам измерить изменения температуры, происходящие в газе при изменении объема, и далее они могли бы обеспечить средства сравнения этих изменений с количеством движущей силы — полученной или затраченной. Они могли бы быть проведены с другими газами, отличными от атмосферного воздуха.

До последнего времени изменения температуры тел, вызванные движением, были очень мало изучены. Этот класс явлений заслуживал бы, однако, внимания исследователей; когда тела находятся в движении, особенно при исчезновении этого движения, или когда они производят движущую силу, происходят значительные изменения в распределении тепла и, возможно, его количества.

Мы сейчас соберем небольшое количество фактов, которые показывают это явление со всей очевидностью.

Соударение тел. Известно, что при соударении тел всегда происходит поглощение движущей силы. Только абсолютно упругие тела могли бы быть единственным исключением, но их в природе не существует.

Между тем известно также, что всегда при соударении тел происходит изменение температуры — она повышается. Было бы неверно, как это сделал М. Бертолле, объяснять выделение тепла в этом случае уменьшением объема тела, поскольку, когда это уменьшение достигается последней стадии, выделение тепла должно было бы прекратиться. Однако это не происходит. Достаточно, чтобы тела могли только изменять форму при ударе без изменения объема, чтобы тепло выделялось.

Если, например, взять куб из свинца и ударять последовательно по всем его граням, в нем будет всегда выделяться теплота; это выделение не будет заметно уменьшаться, пока удары будут продолжаться с одной и той же силой. Это не будет происходить, если выбиваются медали. В этом случае металл не меняет форму после первого удара штампа и эффект столкновения передается не на медаль, а нарезке винта, которая деформируется, и ее опоре. Представляется поэтому, что освобождаемое тепло могло быть обусловлено трением молекул металла, которые меняют взаимное расположение; иными словами, тепло выделяется там, где поглощается движущая сила.

Аналогичные соображения могут быть применены к случаям столкновения двух тел различной твердости, например свинца и железа. Первый из этих металлов становится очень горячим, в то время как второй не меняет чувствительно температуру. Но движущая сила почти полностью пошла на изменение формы первого из этих металлов. Мы можем также назвать как явление той же самой природы тепло, получающееся при вытягивании металлического стержня перед тем, как он готов разорваться. Эксперимент доказал, что чем больше удлинение перед разрывом, тем больше увеличение температуры.»¹⁾

Этот фрагмент однозначно свидетельствует о том, что Карно уже бесповоротно отошел от вещественной теории тепла и подготовился к пониманию того, что “его количество в теле” (т. е. термическая составляющая внутренней энергии) может изменяться, если производится работа. Он перечисляет здесь и эксперименты, которые, будучи поставлены не просто качественно, а с измерениями температуры, могли бы дать количественные характеристики связи тепловых эффектов и работы. Однако и представления о природе тепловых явлений, и содержание возможных экспериментов изложены в самой общей форме; видны только подходы к новой теории тепла.

Известно положение о том, что укоренившаяся и общепринятая теория не может, как это ни парадоксально, быть ниспровергнута только фактами, ей противоречащими; опыт истории показывает, что этого еще недостаточно. Она может быть заменена и окончательно “снята с вооружения” только после появления новой теории, объединяющей и то, что укладывалось в прежнюю теорию, и противоречащие факты. Именно такая ситуация сложилась со старой вещественной теорией тепла и новой — механической. Фактов, не укладывающихся в прежнюю теорию, накопилось более чем достаточно. Необходимо было идти дальше. Здесь возникает целый комплекс вопросов о том, что происходит с частицами тела при сообщении им тепла, каково их движение. Качественно ответ на этот вопрос еще раньше пытались дать многие — от Д. Бернулли до М. Ломоносова, но в целом картина оставалась неясной.

Фрагмент 2

“Если молекулы тел никогда не вступают в плотный контакт между собой, какие бы ни были силы, которые разделяют или притягивают их, в природе никогда не бывает ни выигрыша, ни потери движущей силы. Эта сила должна быть так же неизменна, как материя...”

¹⁾ Carnot S. L'oeuvre posthume de Sadi Carnot // Actes de la table ronde “S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique”. Paris: 1976. P. 195.

...Но как можно представить силы, действующие на молекулы, если они никогда не находятся в контакте между собой, если каждая из них полностью изолирована? Постулирование тонкой жидкости между ними может вызвать только следующие трудности, поскольку эта жидкость неизбежно должна была бы состоять из молекул.”¹⁾

В следующем фрагменте можно также найти обсуждение этой темы, но уже связанное с вопросами о сохранении движущей силы (т.е. энергии) и получением работы.

Фрагмент 3

“Представляется очень трудным проникнуть в реальную природу тел. Чтобы избежать ошибочных умозаключений, было бы необходимо внимательно исследовать источник наших знаний природы тел, их форм, их сил; рассмотреть исходные понятия, посмотреть, из каких посылок они выводятся; рассмотреть, как переходить последовательно к различным уровням абстракции.

Есть ли тепло результат колебательного движения молекул? Если это так, то количество теплоты есть просто количество движущей силы. Пока движущая сила используется для получения колебательного движения, количество теплоты должно оставаться неизменным, что, похоже, следует из калориметрических измерений; но когда оно переходит в движение на значительной дистанции, количество тепла не может оставаться постоянным.

Могут ли быть найдены примеры получения движущей силы без реальной затраты тепла? Кажется, что мы можем найти выделение тепла с затратой движущей силы (впуск воздуха в вакуум, например).

В чем причина выделения тепла при соединении тел? Что такое теплота (calorique) излучения?

Плавление тел, затвердевание жидкостей, кристаллизация — не являются ли они формами сочетания молекул между собой?

Полагая, что тепло представляет собой результат колебательного движения молекул, как можно объяснить переход из твердого или жидкого состояния в газообразное? Когда движущая сила производится при переходе тепла от тела А к телу В, количество этого тепла, поступающего к телу В (если оно не то же самое, что было взято у тела А, а часть была действительно израсходована, чтобы получить движущую силу), остается ли оно постоянным при использовании различных веществ для получения движущей силы.

Существует ли способ использования тепла для производства движущей силы и уменьшения его количества, передаваемого телу В?

¹⁾ Там же. С. 197. В другом месте “Записок” по этому же поводу говорится более определенно: “...все ведет нас к тому, чтобы полагать, что молекулы тел всегда отделены одна от другой некоторым пространством, что они в действительности никогда не находятся в контакте...”

Могли бы мы даже использовать его целиком, не передавая телу В? Если бы это было возможно, можно было бы создавать движущую силу без использования топлива, простым преобразованием теплоты тел.

Как получается тепло, отдаваемое Землей и другими космическими телами путем радиации?

Если, как кажется, доказывают механики, сотворение движущей силы не существует реально, то не может быть какого-либо уничтожения этой силы — иначе все движущие силы во Вселенной могли бы быть уничтожены...”¹⁾

Часть вопросов, которые С. Карно здесь поставил (о природе и характере межмолекулярных взаимодействий, передаче энергии посредством радиации и, наконец, о коренных причинах невозможности полного превращения тепла в работу), на уровне физической науки того времени были вообще неразрешимы. Все они исследованы и решены наукой значительно позже, с помощью статистической физики и теории излучения. Но сама их постановка, опирающаяся на правильные в основе представления, показывает, как далеко ушел Карно от своих современников в понимании дальнейших путей теплофизики.

Главное, что ясно видно, — это совершенно четкое понимание им закона сохранения движущей силы (т.е. энергии) не только в механических процессах (что уже было ясно всем), но и в тепловых. Такой широкий взгляд, предопределяющий общую формулировку закона сохранения энергии, впервые появился у Р. Майера намного позже — только в 40-х годах.

Вместе с тем утверждение этого закона не сняло вопроса о том, может ли все тепло быть превращено в работу. Он дебатировался еще многие годы спустя.

Поскольку эквивалентность тепла и работы была неопровержимо доказана, совершенно естественно возникала мысль о том, что не только работу можно превратить в тепло, но и тепло можно целиком перевести в работу. Такой точки зрения много позже придерживались и Джоуль, и Томсон (Кельвин), предлагавшие полностью отказаться от идей Карно (Томсон потом отошел от этой позиции, за ним — и Джоуль, а Клаузиус с самого начала с ними не соглашался).

Из фрагмента 3 видно, что Карно предвидел возможности такого поворота мыслей. Говоря о том, как *“движущая сила производится при переходе тепла от тела А к телу В”*, он ставит вопрос: *“Существует ли способ использования тепла для производства движущей силы и уменьшения его количества, передаваемого телу В? Могли бы мы даже использовать его целиком, не передавая телу В?”* Для доказательства того, что это невозможно, он пользуется тезисом о невозможности существования, говоря современным языком, вечного двигателя второго рода. *“Если бы это было возможно, то можно было*

¹⁾ Там же. С. 197.

бы создавать движущую силу без использования топлива, простым преобразованием теплоты тел.”¹⁾

Что касается экспериментов, необходимых для выяснения поставленных вопросов, то Карно разработал обширную программу, которая целиком (или в значительной части) сохранилась.

Фрагмент 4

“Эксперименты относительно тепла и движущей силы, которые необходимо проверить.

Повторить эксперимент Румфорда по сверлению металла в воде, но измерять потребляемую движущую силу во время производства теплоты; такие же эксперименты с различными металлами и деревом.

Мешать энергично воду в малом бочонке или в водном насосе двойного действия с поршнем, в котором сделано небольшое отверстие.

Эксперимент того же вида с перемешиванием ртути, алкоголя, воздуха и других газов. Измерять затраченную движущую силу и произведенное тепло.

Ударять кусок свинца и нескольких направлений, измеряя затраченную движущую силу и произведенное тепло. Те же эксперименты для разных металлов.

Впускать воздух в вакуум и в более или менее разреженный воздух; то же самое для других газов и паров. Исследовать посредством манометра и термометра Бреже (Breget) повышение температуры. Оценка ошибки термометра в зависимости от времени, требующаяся, чтобы температура воздуха изменилась на надежное число градусов²⁾.

Опыт Гей-Люссака с другими сосудами равного объема, одним пустым и другим, заполненным воздухом, приводимыми в сообщение между собой.

Удалить воздух из большого сосуда, в котором он находится в сжатом виде, и контролировать его скорость в большой трубе с помещенными в ней твердыми телами; измерить температуру, когда она установится. Определить, будет ли она такой же, как и в резервуаре. Тот же эксперимент с другими газами и с паром при различных давлениях.

Повторить эксперимент Дальтона и провести его под давлением тридцать или сорок атмосфер. Измерить теплоту пара в этом интервале.

¹⁾ Интересно отметить, что и теперь, в начале XXI века, такого рода идеи всерьез выдвигаются и прорабатываются (см.: Бродянский В.М. Вечный двигатель прежде и теперь. М.: Физматлит, 2001 г.).

²⁾ Здесь Карно прорабатывает детали этого эксперимента, занимающего определенное время, чтобы по возможности точно измерить нестационарную температуру газа (другими словами, создать малоинерционную термометрию).

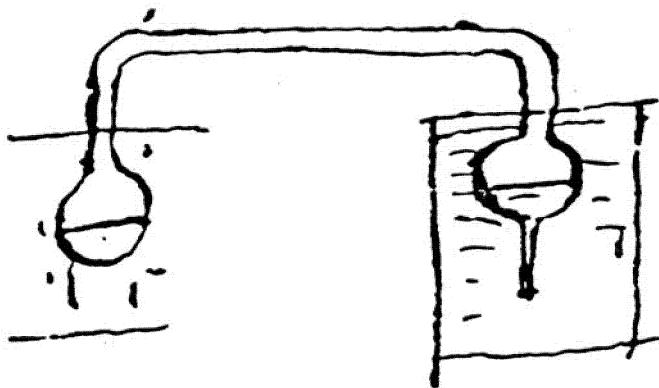


Рис. 21. Схема прибора для проведения опыта по измерению теплоемкости пара (рисунок из рукописи С. Карно)

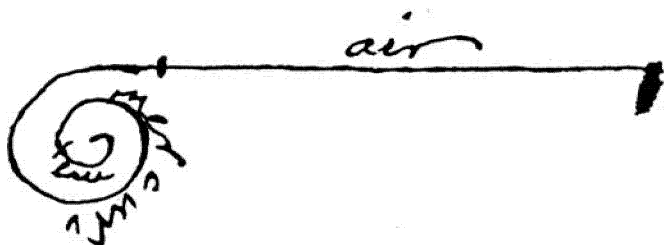


Рис. 22. Спиральная трубка для измерения сжимаемости (рисунок из рукописи С. Карно)

То же самое с парами спирта, эфира, скипидара, ртути, чтобы проверить, приведет ли использование этих агентов к каким-либо различиям в производстве движущей силы.

То же самое с водой, в которой растворена соль — например, хлористый кальций.

Остается ли закон вязкости всегда тем же самым? Измерить теплоемкость пара.

Эксперименты, которые должны быть сделаны для определения сжимаемости паров: калиброванная капиллярная трубка, заполненная водой, ртутью или маслом и воздухом. Погрузить эту трубку в ванну с маслом, ртутью или расплавленным свинцом. Измерять температуру воздушным термометром.

Такие же эксперименты со спиртом, эфиром, сероуглеродом, соляной кислотой, скипидаром, серой, фосфором.

Эксперименты со сжимаемостью пара с использованием котла и термометрической трубки, заполненной воздухом. Термометр поместить в трубку, погруженную в котел, открытую наружу и заполненную маслом или ртутью.

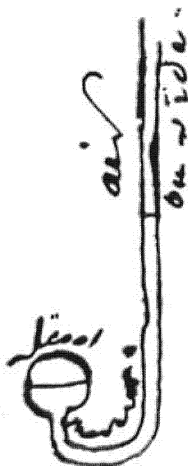


Рис. 23. Прибор для измерения сжимаемости с манометрической трубкой (рисунок из рукописи С. Карно)

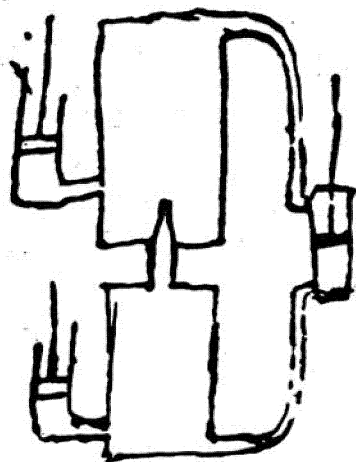


Рис. 24. Схема прибора для изучения дросселирования газов — будущий опыт Джоуля—Томсона (рисунок из рукописи С. Карно)

Эксперименты с использованием простой капиллярной трубки, заполненной последовательно в трех отрезках, расположенных один за другим: первый — воздухом, второй — ртутью, третий — другой жидкостью, сжимаемость которой может быть измерена (спирт, эфир, скипидар, лаванда, сероуглерод, хлористый эфир и т. д.). Один конец трубки может быть погружен в ванну с ртутью или маслом, температура которых измеряется. Столбик ртути может быть сделан достаточно длинным, чтобы позволить воздуху быть предварительно сжатым или разреженным. С одного конца трубка свернута в спираль, прямая часть может быть градуирована (это позволяет измерить сжимаемость ртутного пара).

Эксперименты по сжимаемости паров при низкой температуре с термометрической трубкой, изогнутой вокруг и заполненной частично ртутью, частично водой или спиртом. Ртуть будет действовать своим весом, верхняя часть трубки будет пустой и закупорена или полностью открыта в атмосфере. Шарик помещен в воду, температура которой измеряется. Если трубка закупорена, верхняя ее часть должна быть охлаждена.

Шарик может содержать воду, эфир или раствор скипидара. Если трубка закупорена, может быть замерена упругость пара ртути.

Эксперименты по определению тепла паров посредством барометрической трубки с двумя увеличенными шаровыми сосудами. Один из них может быть погружен в холодную воду, и повышение температуры этой воды будет показывать тепло пара. Другой сосуд может быть нагрет кипящей жидкостью или огнем.

Вода, алкоголь, скипидар, эфир, ртуть, соляная кислота, сероуглерод.

Опыты могут быть повторены, и результаты суммированы. Инструменты: хороший термометр, 1; обычные выдувные трубки, 6; те же длинные, 3; трубки с выдутыми шарами, 6; обычные трубки, 2; алкоголь, эфир, скипидар, сероуглерод, 10 г; льняное масло, 1 кг; жестяной сосуд для его подогрева. Маленькая портативная печь...”¹⁾

Эта обширная программа экспериментов под силу только большой исследовательской лаборатории. В случае ее осуществления она продвинула бы науку вперед на несколько десятилетий в части как исследования теплотфизических свойств газов, так и точного определения механического эквивалента теплоты. В планах Карно среди прочих содержатся и два эксперимента (вернее, две серии экспериментов), вошедшие в золотой фонд науки, но проведенные другими и намного позже. Первый из них — экспериментальное определение точного значения механического эквивалента тепла путем перемешивания воды в калориметре — классический опыт Джоуля (1849 г.). Второй — не менее знаменитые опыты с дросселированием газов, позволившие открыть так называемый эффект Джоуля—Томсона (1852 г.).

Мы, к сожалению, не располагаем данными о том, в какой степени С. Карно подготовил базу для этих экспериментов, на чью помощь при их проведении он рассчитывал и удалось ли ему провести какие-либо из них.

В заключение приведем еще один фрагмент “Записок”, едва ли не самый важный, в котором С. Карно дает, по существу, общую характеристику закона сохранения энергии и приводит вычисленное им значение механического эквивалента теплоты.

Фрагмент 5

“Тепло есть просто движущая сила или скорее движение, которое изменило свою форму. Это движение частиц тел. Везде, где имеется потеря движущей силы, происходит в то же самое время производство тепла в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Напротив, везде, где происходит исчезновение тепла, там вырабатывается движущая сила.

Мы можем установить как общее положение, что движущая сила существует в природе в неизменном количестве, что она, строго говоря, не может ни создаваться, ни исчезнуть. В действительности она меняет свою форму; она производит иногда один вид движения, иногда другой, но никогда не уничтожается...

...В соответствии с некоторыми идеями, которые я сформулировал относительно теории теплоты (chaleur), производство единицы движущей силы требует 2,7 единицы теплоты. Машина, которая

¹⁾ Там же. С. 198.

могла бы произвести 20 единиц движущей силы¹⁾ на килограмм угля, должна была бы уничтожить $20 \cdot 2,70/7000$ единиц тепла, выделившегося при сжигании: $20 \cdot 2,70/700 = 8/1000$, т. е. округленно меньше чем $1/100$.²⁾

Эти строки, ставшие почти хрестоматийными, как бы подводят итог второй половине работ С. Карно, в которой им положено начало первому закону термодинамики (так же как в “Размышлениях...” было положено начало второму). По этому поводу А. Пуанкаре в своем курсе термодинамики выразился так: “Можно ли яснее и точнее высказать закон сохранения энергии?”

Характерно, что, даже сделав такой принципиально важный научный вывод — количественно определив связь, лежащую в основе фундаментального закона природы, С. Карно, как истинный инженер, не удержался от того, чтобы сразу примерить его к практике. Он тут же вспомнил о паровой машине и связал полученную величину с расходом в ней угля.

Карно не раскрывает в сохранившейся части “Записок” способ, каким он рассчитал механический эквивалент теплоты. На этот счет имеются разные предположения. Одно из них (L. Decombe) опирается на догадку, что он исходил из разности значений теплоемкости газов при постоянном давлении и постоянном объеме ($c_p - c_v$), как в дальнейшем сделал Р. Майер. Другой вариант, более вероятный, предложил С. Raveau. В “Размышлениях...” Карно рассчитал работу цикла между изотермами 0 и $0,001^\circ\text{C}$ как $3,72 \cdot 10^{-7}$ единиц работы и тепло компрессии как 0,267 единицы тепла. Он мог тогда написать, что величина $dp \cdot dv$, т. е. элементарная работа, равна $(dp/dT)dT \cdot dv$, которая для идеального газа соответствует $(dT/T)_p \cdot dv$. Величина $p \cdot dv$ — это работа компрессии, так что, положив $dT = 0,001^\circ\text{C}$ и $T = 267^\circ\text{C}$, можно получить значение механического эквивалента тепла.

Так или иначе, но эта величина была им найдена, и сделано это было до 1832 г., т. е. намного раньше, чем другими исследователями (Майер — 1842 г., Джоуль — 1843 г.). Таким образом, С. Карно принадлежит приоритет в открытии основ двух фундаментальных физических законов, ставших впоследствии базой новой науки — термодинамики.

Жизнь, однако, распорядилась так, что он не получил при жизни признания ни за второй (который был опубликован в 1824 г. первым), ни за первый, открытый позже второго. Все разработки С. Карно, сделанные им в 1824–1832 гг., пролежали многие годы в сейфе его брата. Движение науки между тем продолжалось. С трудом, в борьбе прокладывая себе дорогу то, что уже было открыто, но не стало вовремя достоянием науки. Гениальные соображения С. Карно о законе

¹⁾ Единица движущей силы (т. е. работы) — это 1000 кгм, а единица тепла — большая калория. Отсюда $1000 \text{ кгм} = 2,7 \text{ ккал}$, или $1 \text{ ккал} = 1000/2,7 = 370,4 \text{ кгм/ккал}$.

²⁾ Там же. С. 199.

сохранения энергии были опубликованы тогда, когда они могли быть приняты только как исторический документ.

И без того извилистый путь создания новой науки — термодинамики из-за этого еще усложнился. Мало того, что второй ее закон был открыт раньше первого, оказалось еще, что первый закон был открыт дважды. Об отношении к этому “беспорядку” некоторых слишком “правильных” деятелей науки остроумно написал французский физик Л. Бриллюэн: «Карно оказался весьма неосторожным и придумал принцип, который мы теперь называем “вторым”, до того, как был сформулирован первый! И в течение целого века многочисленные профессора упрекали его за этот поступок».

Но вернемся, однако, к событиям, происходившим непосредственно после выхода мемуара С. Карно.

Мысли С. Карно, изложенные в “Размышлениях...”, все же пребывали в забвении относительно недолго. Через два года после его смерти, в 1834 г., книга была включена в научный оборот и с тех пор оказывала определяющее влияние на становление и развитие термодинамики. Первым возродил работу Карно и дал ей дальнейшее развитие тоже выпускник Политехнической школы, закончивший ее на четыре года после Сади — Э. Клапейрон. Вслед за ним У. Томсон (Кельвин) и Р. Клаузиус продолжили и в основном завершили то, что начинал С. Карно. При этом идеи Карно воспринимались и развивались ими далеко не однозначно.

Намного позже “вырвалась из заключения” еще одна (пока последняя) небольшая рукопись из неопубликованных работ С. Карно. Она относится не к термодинамике, а к экономике. Этот небольшой фрагмент был передан для публикации Пьером-Сади Карно, одним из современных представителей семьи Карно, и подготовлен к изданию Ж. Грюневальдом; вышел в свет в 1976 г. Этот фрагмент, не имеющий ни начала, ни конца, по-видимому, вырван из контекста. Несмотря на это и на малый объем, он, несомненно, заслуживает внимания, поскольку дает некоторое представление о взглядах С. Карно на экономические вопросы.

Об интересе С. Карно к политэкономии и высокой оценке его возможностей в этой науке мы уже упоминали. Небольшой фрагмент экономической части записей С. Карно это подтверждает. В нем нет столь фундаментальных, революционных идей, как в “Записках”, но глубокие мысли представляют интерес не только для того времени. В этих заметках встречаются продуманные положения и отдельные фразы, фиксирующие вопросы, над которыми автор собирался еще поработать. Тем не менее рассматриваемая тема и общее направление мыслей, связанных с ней, просматриваются достаточно четко.

В заключительной части “Размышлений...” Карно уже затрагивал экономические вопросы. Там речь шла о необходимости при эксплуатации паровых машин учитывать все виды затрат, а не только расходы на топливо. Речь в рукописи идет о более фундаментальном вопросе — о налогах и, в более широком плане, о степени вмешательства государства в хозяйственную жизнь страны, т. е. о вопросе, не потерявшем

значения и в наше время. Важно отметить прежде всего принципиальное отличие позиции Карно от точки зрения Ж. Б. Сэя, курс лекций которого он прослушал. Сэй исходил исключительно из взглядов предпринимателя, из выгоды той или иной системы налогообложения для него. Такая точка зрения в то время была господствующей, все остальное лежало за пределами анализа. Карно, напротив, не забывая об интересах предпринимателя, ставит на первое место интересы общества, нации и, наконец, государства, которое должно стоять на страже этих интересов.

Здесь Сади прямо следует заветам отца, понимавшего роль государства именно таким образом. Лазар высказал свой подход к задачам политической экономии в Магдебурге, при разговоре с сыном, очень четко, одной емкой пророческой фразой: “Если настоящие математики ¹⁾ берутся за экономику и прикладные экспериментальные методы, то должна быть создана новая наука — наука, которая была бы нужна для того, чтобы воодушевлять любовь к человечеству с целью изменить правление (правительство)” ²⁾.

С этой точки зрения С. Карно рассматривает налоги не только (и не столько) как источник дохода государства, но и как средство формирования сельскохозяйственного и индустриального развития страны. Поэтому он поддерживает необходимость вмешательства государства в хозяйственную жизнь. *“Хотя согласно системе взглядов современных (modernes) экономистов было бы желательно, чтобы правительство как можно меньше вмешивалось в дела промышленности и коммерции, нельзя, однако, отрицать, что во многих обстоятельствах это вмешательство могло бы быть полезным.”* Далее развивая эту мысль, он не соглашается с экономистами, которые *“рассматривают налоги как необходимое зло для покрытия расходов общества”*, и утверждает, что *“...налоги представляют собой способ влиять на производство и коммерцию страны, заставить их развиваться в направлении, которое бы они не избрали естественным путем...”* ³⁾.

Другими словами, С. Карно еще в начале XIX века четко понимал необходимость сочетания рыночной экономики с государственным регулированием (одно из средств которого — налоговая политика). Однако тут же он предостерегает: *“... несомненно, это могло бы иметь неприятные последствия, если бы налоги были установлены безрассудно (или с единственной целью получения денег)...”*

¹⁾ Термин “математик” в то время (вплоть до середины XIX века) имел более широкий смысл, чем теперь; математиками называли людей, владеющих математическими методами и умеющих применять их в научных целях независимо от области работы. Профессиональные “чистые” математики появились только в XIX веке.

²⁾ Actes de la table ronde “S. Carnot et l’essor de la thermodynamique”. Paris: 1976, P. 393.

³⁾ Там же. С. 194.

Многие из конкретных вопросов налоговой политики только поставлены: по-видимому, автор собирался впоследствии дать на них развернутые ответы. Например: *“Расходы департаментов, общин. Расходы на обслуживание дорог, каналов, морских портов, на сельских полицейских, лесников и т. д., на бригаду, обеспечивающую безопасность на дорогах, в городах, на море, расходы на совершение правосудия — кто же должен их нести? Кто должен взять на себя расходы на памятник, на новую дорогу, на осушение болота и т. д.”*¹⁾ Другие вопросы им разобраны, и на них даны более или менее подробные ответы.

Подробный анализ содержащихся в этой рукописи мыслей — задача для специалистов по истории экономических учений. Здесь мы отметим лишь несколько предложений С. Карно, часть из которых соответствовала тому, что было впоследствии реализовано.

В числе таких идея — замена в ряде случаев тюремного заключения штрафом: *“Тот, кого вы помещаете в тюрьму, предпочел бы, может быть, уплатить штраф; тюрьма лишает его работы и вынуждает правительство его кормить”*. Пишет он также о налоге *“на бесполезное или излишнее потребление”*, который тоже *“был бы своего рода штрафом”*, а также о способах компенсации некоторых расходов общества: *“Было бы справедливо, если бы лица, в особой мере пользующиеся определенными общественными расходами, заплатили бы налоги на это; таким образом, владельцы экипажей заплатили бы за использование дорог, а владельцы судов — за использование каналов, а владельцы транспортных средств, передвигающихся в городе, платили бы за поддержание на должном уровне мостовых”*²⁾.

С. Карно считает, что правильно действующее правительство нужно рассматривать *“как главу крупной ассоциации, в которую входят все граждане”*.

Карно занимали и организационные вопросы, связанные с налогообложением. Так, он считал необходимым, чтобы *“любое изменение налоговой системы проводилось постепенно, во избежание резких изменений состояния, чтобы проследить воздействие нового налога и момент, когда нужно остановить его развитие...”*³⁾ Много там и других интересных мыслей.

То обстоятельство, что С. Карно, который будучи, пользуясь современными терминами, специалистом в области термодинамики и энергетики, занимался вопросами экономики, весьма примечательно. В конце XX века связи термодинамики с экономикой стали настолько явными, что настала необходимость их изучения и использования. Это

¹⁾ Там же. С. 395.

²⁾ Там же.

³⁾ Там же.

привело к возникновению специальной области науки — “термоэкономики”, которая уже доказывает свою практическую полезность ¹⁾).

К сожалению, все, что содержалось в неизданных записках С. Карно, как термодинамических, так и экономических, не смогло повлиять на развитие науки и политику. Мы можем только использовать их как исторический материал — факт печальный и вместе с тем поучительный: он показывает силу гения, вред близорукости и эгоизма и непреодолимости поступательного движения науки. Но то, что С. Карно успел опубликовать, — “Размышления о движущей силе огня...” — в полной мере сыграло свою определяющую роль и на долгие годы послужило основой развития новой науки — термодинамики.

¹⁾ Бандура А.В., Бродянский В.М. Ноосферная экономика // Энергия. 1996. № 11; Bandura A., Brodiansky V. Thermodynamics extends economic potential // Energy. 2001. Vol. 26. P. 811–814.

Глава 5

Второе рождение мемуара Карно. Завершение разработки основ термодинамики (1832-1878)

Мемуар Сади Карно и работа Э. Клапейрона

Прошло десять лет после выхода в свет работы С. Карно и два года после его смерти. Никаких внешних признаков того, что опубликованные им новые идеи и открытия в какой-то степени начали воздействовать на современников, не наблюдалось. Ни один автор в работах о паровых машинах ни словом не упомянул о Карно и его теории. Все же след от выхода книги С. Карно и событий, с ним связанных, не мог исчезнуть; раньше или позже кто-то должен был “напасть” на него, обнаружить богатейшее наследство и, используя его по мере своих сил, двинуться дальше. Такой человек нашелся, и ему пришлось проделать ту работу, о которой со свойственной великим поэтам проницательностью писал Гете: “Значительное открытие задает хлопоты множеству людей, которые сперва должны узнать его, потом понять, потом отработать по-своему и передать дальше”¹⁾.

Применительно к открытию Карно первым из этого множества людей стал Э. Клапейрон, сыгравший большую роль как в возрождении и распространении идей С. Карно, так и в создании новой науки — термодинамики.

Бенуа Поль Эмиль Клапейрон родился в Париже в 1799 г. После окончания в 1818 г. Политехнической школы он завершил свое образование в Горной школе. Дальше его жизнь сложилась весьма необычно.

Русский император Александр I во время пребывания в Париже (после вступления в него русской армии) был ознакомлен с системой подготовки инженерных кадров во Франции. Он знал о высоком престиже Политехнической школы, Школы дорог и мостов и других высших инженерных учебных заведений. Известны его лестные слова о первой из них: “это самое лучшее учреждение, созданное человеком”. Александр I старался и раньше в максимальной степени использовать французских ученых, инженеров, военных специалистов (в том числе и Л. Карно) для службы в России. Один из обрусевших французских

¹⁾ Гете В. Годы странствий Вильгельма Мейстера // Собр. соч. М.: Худ. лит., 1975. Т. 8. С. 365.

инженеров — Базен, приехавший в Россию в 1810 г. (который к этому времени уже назывался Петр Петрович), будучи в 1819–1820 гг. в Париже, пригласил для работы в Петербурге четырех молодых инженеров, в том числе Клапейрона и Ламе ¹⁾).

Французское горное начальство согласилось отпустить Клапейрона в Россию при соблюдении двух условий: он должен был посетить все шахты и металлургические заводы вдоль маршрута его путешествия в Петербург и вести записки обо всем полезном, что увидит по дороге. Клапейрон принял эти условия. В 1820 г. он и Ламе прибыли в Петербург и с начала учебного года начали преподавать в Институте путей сообщения (на французском языке). Условия были вполне приемлемыми: “сверх штатного расписания по чину” (это 3000 руб. + 1000 руб. “на стол”) еще 3000 руб. в год. В июне 1821 г. “Эмилий Клавдиев Клапейрон” и “Гаврило Францов Ламе” были зачислены в Корпус инженеров путей сообщения майорами и профессорами института. Клапейрон получил кафедру прикладной математики и химии. При тогдашней, не столь развитой дифференциации наук и широкой подготовке инженеров такое сочетание было вполне естественным.

Пребывание Клапейрона в России было очень плодотворным и благоприятно сказалось на его быстром научном, педагогическом и инженерном росте. Совместная работа русских и французских ученых происходила в тесном содружестве. По отзывам начальства, Клапейрон и Ламе показали себя “как по обширным познаниям, так и методе изучения полезнейшими офицерами”. В свою очередь, французские профессора “часто выражали мнение, что русские отличались быстрыми успехами”, и “не раз удивлялись, с каким искусством и уверенностью управляли они (выпускники института. — В. Б.) обширными работами и большими массами рабочих” ²⁾. Занятия в Институте велись на высоком теоретическом уровне. Согласно действовавшему тогда (очень неплохому) положению, “профессор высших наук, как математических, так и физических, для поддержания на высоте идей нынешнего века должен иметь глубокое наблюдение за ходом новых результатов, вводить сии результаты в свой курс” ³⁾.

В 1823 г. учение о двигателях и устройствах, в которых реализуется их работа, было выделено в отдельный предмет под названием “Прикладная механика”. Сюда входили и паровые машины. Лекции по этому предмету читал Клапейрон. Таким образом, он начал заниматься паровыми машинами почти одновременно с Карно. В 1828 г. этот курс был размножен обычным для того времени путем — литографированием.

¹⁾ Г. Ламе (1795–1870) — французский математик, механик и инженер. Вместе с Клапейроном работал в России с 1820 по 1831 г. Член-корреспондент Петербургской (с 1829 г.) и Парижской академии наук (с 1843 г.).

²⁾ *Житков С.М.* Институт инженеров путей сообщения: Исторический очерк. СПб.: 1899. С. 14

³⁾ Там же. С. 17.

Это было первое пособие по такому курсу, изданное в России. Поскольку преподавание велось на французском языке, курс был изложен тоже по-французски.

В 1823 г. Клапейрон и Ламе разработали два проекта висячих мостов для Москвы: через Язу и Москву-реку. Проекты получили одобрение ведомства путей сообщения, но осуществлены не были.

Примером, хорошо иллюстрирующим отношение французских ученых к стране, в которой они работали, может служить рапорт, поданный по начальству Клапейроном и Ламе в 1824 г. В нем они предлагали бесплатно прочесть ряд лекций по физике и химии в пользу пострадавших от наводнения в Петербурге (разрешение не было дано).

Работа Клапейрона в Институте путей сообщения проходила вполне успешно. Ему повышали жалованье, награждали орденами, постепенно повышали в чине (к 1830 г. он дослужился до полковника). В 1830 г. Клапейрон был избран иностранным членом-корреспондентом Петербургской Академии наук. Вместе с тем после подавления восстания декабристов и воцарения Николая I политическая обстановка в стране стала меняться и вместе с ней начал ухудшаться и климат в Институте. По этому поводу А. И. Дельвиг писал: «Император Николай I и великий князь Михаил Павлович очень не любили инженеров путей сообщения и вследствие этого и заведение, служившее их рассадником. Эта нелюбовь основывалась на том мнении, что из института выходят ученые, следовательно, вольнодумцы...»¹⁾ Ужесточились формальные требования к дисциплине, профессора стали получать взыскания за различные провинности.

Особенно тяжелая обстановка сложилась после революции 1830 г. во Франции. Полиция стала следить за всеми французами независимо от их политических взглядов и положений. Для Николая I даже новый король Франции Луи-Филипп Орлеанский был чуть ли не карбонарием. Доходило до анекдотических случаев: король Франции весной 1831 г. наградил Клапейрона и Ламе кавалерскими знаками ордена Почетного легиона. Однако Николай им запретил их носить. Клапейрона, который хотя и высказывал свободно свои мнения, но был человеком скорее консервативных убеждений и весьма религиозным, все равно считали подозрительным. На всякий случай его отправили в командировку на Вытегру инспектировать работы, которые не только не начинались, но и проекты по ним не были составлены. Обстановка складывалась так, что работу в России продолжать было невозможным. Клапейрон и Ламе были вынуждены 18 сентября 1831 г. подать рапорты на имя государя. Перечислив этапы своей службы, отметив, что «в походах, штрафах и отпусках не бывал», Клапейрон далее писал: «...ныне по причине болезни не могу продолжать службу, о чем и прилагаю при сем медицинское свидетельство. Прошу дабы Высочайшим Вашего Императорского Величества указом повелено было мое прошение

¹⁾ Воронина М.М. Габриель Ламе. М.: Наука, 1987. С. 62.

принять и меня, вышеименованного, за болезнью от службы на законном основании уволить”¹⁾).

В качестве болезни Клапейрон в отличие от своего друга Ламе, у которого оказались “геморроидальные припадки” и даже начало “опасной болезни — чахотки”, ограничился лишь “катаром мочевого пузыря”. Характерно, что название болезни вписано в рапорт позже, другими чернилами. Николай не стал тянуть с решением и 21 октября 1831 г. подписал указы. Каждый был “по болезни уволен от службы с мундиром”. На радостях, в связи с избавлением от “опасных” французов, каждому было выдано из казны на проезд во Францию по 5 тыс. руб. В конце 1831 г. Клапейрон, прослужив в России немногим более 11 лет, вернулся во Францию.

За эти годы он из молодого, подающего надежды инженера превратился в крупного и авторитетного ученого, автора и соавтора ряда серьезных работ, известного как в России, так и во Франции.

Сразу же по возвращении Клапейрон без какой-либо паузы продолжил и инженерную, и научную деятельность. Основным ее направлением стало развитие железнодорожного транспорта Франции и связанных с этим научных задач. Уже 20 июня 1832 г. Ламе и Клапейрон выступили на собрании Политехнической ассоциации с докладом “О железных дорогах, рассматриваемых с точки зрения обороны территории страны”, который уже в июле был опубликован.

Ламе и Клапейрон совместно с известными инженерами и предпринимателями братьями Е. и С. Флаша создали в форме акционерного общества консультативную организацию для обслуживания крупных строек и предприятий. Общество ставило перед собой достаточно широкие задачи. В предисловиях к книге “Политические и практические взгляды на общественные работы во Франции”, вышедшей уже в сентябре 1832 г., организаторы общества писали: “Желая счастья и процветания стране, мы объединились для изучения всех вопросов, важных для развития торговли, финансов и строительных работ; мы объединились, чтобы дать наше мнение по этим вопросам ... так как они становятся сегодня поистине политическими вопросами”. В книге высказывается мнение о том, что “государственный способ проведения строительства мостов и дорог выгоднее для страны, чем передача этих работ в частные руки”²⁾).

Наряду с инженерно-научной и предпринимательской деятельностью Клапейрон возобновил и преподавательскую работу. Уже в октябре 1832 г. он занял профессорскую должность в Горной школе Сент-Этьена. В дальнейшем он стал профессором Школы дорог и мостов. В связи с деятельностью в области железнодорожного транспорта Клапейрон проявлял все больший интерес к паровым машинам — теме, которой он начал заниматься еще в России. Он подготовил и читал курс паровых машин в высшем классе Школы дорог и мостов (с 1844

¹⁾ Там же. С. 65.

²⁾ Там же. С. 123.

по 1864 г.). 22 марта 1858 г. Клапейрон был избран членом Французской академии наук по секции математики и механики (на место, освободившееся после смерти Коши). Умер Клапейрон в 1864 г. в Париже ¹⁾).

Клапейрон оставил большое число научных работ по математике, механике и строительству. Однако самая важная и известная его работа, благодаря которой он вошел в историю науки — большая статья (переиздававшаяся позже в виде отдельной книги) “О движущей силе тепла”, посвященная изложению и дальнейшему развитию идей, выдвинутых в мемуаре С. Карно. Статья Клапейрона была опубликована не сразу. Вначале она была послана им в “Annales des Mines” в 1833 г., но опубликовать ее удалось в “Journal de l’ecole Polytechnique” в 1834 г. ²⁾

Клапейрон вернулся в Париж еще при жизни С. Карно. Однако никаких сведений о личных контактах между ними в течение небольшого срока, остававшегося до смерти С. Карно, не сохранилось, хотя не исключено, что они оба могли присутствовать на каком-либо из заседаний Политехнической ассоциации до июня 1832 г. Трудно предположить, что Клапейрон приступил к этому труду только после возвращения во Францию, скорее всего, он начал его еще в России: сделать такую серьезную работу за короткий срок едва ли возможно. Книгу С. Карно он мог изучить в Петербурге — французская колония в России поддерживала постоянную связь с родиной. Выписывались все основные, в том числе и научные, периодические издания и посылались в них статьи для опубликования. Выписывались также и вновь выходящие книги по тематике, относящейся к научным интересам преподавателей, чтобы “иметь глубокое наблюдение за ходом новых результатов”.

В течение нескольких последующих лет судьба труда Э. Клапейрона мало отличалась от участи книги С. Карно. В третьем издании уже упоминавшейся книги Ф. Араго о паровых машинах (1837 г.) опять ни слова не говорится ни о С. Карно, ни о Э. Клапейроне, ни об их работах. Аналогично реагировали (вернее, не реагировали) на появление работы Клапейрона и другие французские специалисты по теории газов и паровым машинам. Тем не менее труд Клапейрона сыграл огромную роль в истории науки; не говоря уж о том, что его собственный вклад был достаточно велик, главное заключалось в том, что он продолжил дело С. Карно и помог ознакомить с его открытиями и идеями следующее поколение исследователей. Но это дало результаты уже в 40-х годах, и не во Франции, а в Германии и Англии. Поистине “нет пророка в своем отечестве”.

Работа Клапейрона “О движущей силе тепла”, как видно уже по самому ее названию, близка по теме и целевым установкам к мемуару Карно. Большинство идей, развиваемых в ней, берет начало в

¹⁾ Одна из парижских улиц носит его имя.

²⁾ В 1843 г. работа Клапейрона была переведена на немецкий язык. Ее издатель, И. Поггендорф, во введении писал: “Это сочинение, привлекавшее до сих пор мало внимания, показало уже теперь свою значительность и полное право на успех”. В 1847 г. был издан английский перевод.

нем. Это не скрывает и сам автор. Во вступительном разделе после краткого упоминания о работах Мариотта и Гей-Люссака, Араго и Дюлонга, Лароша и Берара, а также Лапласа и Пуассона по теплофизическим свойствам газов он переходит к главному: «Наконец, среди произведений, посвященных учению о теплоте, я упомяну еще одну работу — С. Карно, вышедшую в 1824 г., “Размышления о движущей силе огня”. Основополагающая мысль его исследования представляется мне плодотворной и безукоризненной; его выводы основываются на недопустимости предположения о том, что можно получать движущую силу или теплоту из ничего. Некоторые выводы, к которым приводит это ключевое положение, следующие.

а) Если газ при определенных значениях давления и объема переходит при неизменной температуре к другим определенным значениям давления и объема, то количество полученного или отведенного тепла не зависит от природы выбранного газа;

в) Разность теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме для всех газов одна и та же;

с) Если газ меняет объем при неизменной температуре, и количества теплоты, которые газ отдает или получает, располагаются в арифметической прогрессии, то изменения объемов располагаются в геометрической прогрессии.

Эти новые положения кажутся мне достойными внимания математиков. Я считаю их совершенно безукоризненными, и они получают все большее значение благодаря тому, что первое из них нашло экспериментальное подтверждение в работах Дюлонга.

Поэтому я считаю нужным возобновить эту теорию. С. Карно избегал употребления формального математического языка и поэтому пришел через ряд тонких, но трудно понимаемых умозаключений к ключевым выводам, которые без труда могут быть выведены, как я покажу далее, из общих законов. Однако я предварительно считаю необходимым обсудить главную гипотезу, которая служит основой исследования Карно и которая будет и моим исходным пунктом»¹⁾.

Из этого отрывка видно, что Клапейрон с величайшим уважением относится к Карно и всему тому, что тот сделал в науке и изложил в своем мемуаре. Вместе с тем это не помешало Клапейрону увидеть и недостатки изложения, встречающиеся у Карно (главным образом методического характера), а также отметить места его работы, где можно было продвинуться существенно дальше. Он успешно выполнил обе задачи, следующие из этого. Ему удалось не только более строго и четко изложить большую часть идей Карно, но и сделать свой существенный вклад в развитие науки “о движущей силе теплоты”. Обращает на себя внимание уверенный и методически продуманный стиль работы Клапейрона. Видно, что писал ее человек с большим жизненным и педагогическим опытом, который, несмотря на относительно

¹⁾ *Clapeyron E.* Über die Bewegende Kraft der Wärme // *Annalen der Physik und Chemie.* 1843. Bd. 59/29. S. 451.



Рис. 25. Э. Клапейрон

молодой возраст (ему было тогда 35 лет), многое успел увидеть, узнать и сделать. Подробное рассмотрение работы Клапейрона выходит за рамки этой книги; здесь важное другое — проанализировать те стороны этой работы, которые непосредственно связаны с дальнейшей историей открытий и идей Карно.

Выше уже отмечалось, что Клапейрон по-новому изложил и даже продвинул вперед почти все идеи Карно. Только одна из них, относящаяся к сомнениям в правильности вещественной теории теплоты, прошла для него незамеченной. Он не смог не только ее развить, но и понять: сказалась разница и в размере, и в характере дарований.

Здесь уместно вспомнить одно из высказываний известного французского физика Л. Бриллюэна о Карно, которого он след за англичани-

ном У. Томсоном (Кельвином) и немцем М. Планком считал “одним из величайших гениев науки”. “Он был пионером. Он прокладывал свой путь через неизвестную страну и мог позаботиться только о тропинке для себя; он не имел времени для того, чтобы оставить позади удобную дорогу для тех, кто пойдет за ним”¹⁾. Если продолжить удачный образ тропинки, то следует добавить, что эта тропинка шла по весьма гористой местности и в некоторых местах прерывалась провалами, которые Карно преодолевал такими прыжками, которые никак не укладывались в сознании современников.

Клапейрон, напротив, был человеком с умом математического склада, выдающимся методистом и педагогом. Никаких прыжков он не допускал. Ему и пришлось прокладывать более широкую дорогу вслед за Карно и строить мосты через овраги. То, что при этом он упустил один важный аспект, связанный с противоречиями в теории теплоты, нельзя, разумеется, ставить ему в вину — время еще не подошло. Но уже

¹⁾ Бриллюэн Л. Термодинамика, статистика, информация // УФН. 1962. Т. 27, вып. 2. С. 341.

факт, что он единственный оценил и понял работу Карно, говорит сам за себя. В целом же Клапейрон блестяще справился с задачей. При этом он двигался не только по тропинкам Карно, но и там, где Карно еще не ходил. Но даже по проложенной им удобной дороге последовали далеко не сразу, настолько Клапейрон был впереди других специалистов.

Что же конкретно сделал Клапейрон в изложении и развитии мыслей работы Карно?

Прежде всего, если оставить в стороне приведение в продуманную последовательную систему (введение, 8 разделов и заключение) изложения мемуара Карно, нужно отметить удачное использование строгого математического аппарата, касающегося как аналитических выражений, так и геометрического представления процессов изменения состояния газов. Многие, современные дифференциальные уравнения термодинамики ¹⁾ в сущности, ведут начало от формул, выведенных в этой работе Клапейроном. Точно так же все современные методы анализа процессов на диаграммах состояния рабочего тела ведут свою родословную от придуманной им диаграммы давление—удельный объем ($p-v$ -диаграммы), позволяющей наглядно представить термодинамические процессы и циклы. Основа для появления этой идеи была заложена еще Дж. Уаттом, когда он получил первую индикаторную диаграмму: давление p — ход поршня l . Поскольку ход поршня l пропорционален описанному объему V цилиндра, оставалось сделать еще один шаг — заменить на оси абсцисс объем V удельным объемом v , равным отношению V/G , где G — вес пара, находящегося в цилиндре. Работая над книгой Карно, Клапейрон и сделал этот решающий шаг; тем самым он “оторвал” диаграмму от цилиндра машины, превратив ее в универсальное средство изображения всех процессов, проходящих и в машине, и вне ее. Далее Клапейрон воспользовался этой диаграммой для представления и анализа цикла Карно.

Говоря о методической стороне работы Клапейрона, нельзя не упомянуть и о том, что он ввел в науку и применение элементарных (бесконечно малых) циклов Карно; этим приемом в несколько измененном виде впоследствии воспользовался Р. Клаузиус. (Такой прием “сужения цикла”, правда, применил и Карно при вычислении работы циклов на разных веществах, но не довел его до логического конца.) Клапейрону это дало возможность математически доказать справедливость постулатов Карно, несмотря на то, что он непоколебимо придерживался вещественной теории теплоты и считал, что количество подведенного в цикле тепла Q_1 равно количеству отведенного Q_2 .

Собственный вклад Клапейрона в развитие будущей науки — термодинамики, выходящий за пределы методических достижений и доказательств положений Карно, обычно связывают с двумя уравнениями, носящими его имя. Первое из них — уравнение Клапейрона, связывающее давление, объем и температуру $pv = R(267 + t)$. Правильнее

¹⁾ См., например: Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. М.: Наука, 1981.

было бы называть его уравнением Карно—Клапейрона, так как впервые оно было выведено в работе Карно. Однако вывод второго уравнения, устанавливающего связь теплоты парообразования с давлением и температурой, — так называемое уравнение Клапейрона—Клаузиуса ¹⁾ — сделан им самостоятельно и полностью относится к заслугам Клапейрона.

Это уравнение, записанное Клапейроном в виде $k = c \frac{dp}{dT}$ (где k — теплота испарения), привело его к принципиально важному выводу: “Когда давление будет достаточно большим, и температура достаточно высока, чтобы плотности пара и жидкости были одинаковы, то скрытый теплород будет равен нулю.” Отсюда следует, что, поскольку “скрытый теплород” есть не что иное, как теплота испарения, Клапейрон был первым, кто совершенно ясно сформулировал понятие о критической точке и ввел его в науку.

В то время открытия существования критической точки не было по достоинству оценено ни самим автором, ни кем-либо в научных кругах: оно просто прошло незамеченным. Это и понятно. Параметры основного рабочего тела — водяного пара были еще очень далеки от критических. Что касается исследований низкокипящих жидкостей, то они были на самой ранней стадии. Тем не менее теоретическое доказательство существования критической точки — крупное открытие, и честь быть его автором несомненно принадлежит Клапейрону.

Однако дело этим не ограничивается. Клапейрон, получив эту формулу, впервые ввел в науку, исходя из идей Карно, новый мощный инструмент исследования — метод циклов, нашедший в дальнейшем обширное применение. По существу, долгие годы это был единственный метод, позволявший устанавливать связи между термодинамическими характеристиками процессов, связанными с преобразованиями, в которых участвуют тепло и работа всех видов. Только намного позже, с введением Гиббсом метода потенциалов (в 1870 г.), метод циклов постепенно отошел на второй план, но остался на вооружении термодинамики как “старое, но грозное оружие”. Первыми им воспользовались братья Джеймс и Уильям Томсоны. Применяв “узкий” цикл Карно к анализу затвердевания воды, они показали влияние повышения давления на понижение точки затвердевания воды.

В заключение необходимо уделить внимание тому, чего не понял в работе Карно (и, следовательно, не мог развить) Клапейрон. Если говорить о прикладной, инженерной стороне книги Карно, то в труде Клапейрона она значительно слабее, чем у Карно. Повторяются выводы о выгодности повышения параметров пара, возможности бинарных

¹⁾ Следует отметить, что Клаузиус использовал это уравнение уже в готовом виде, но вставил в него более точную величину абсолютной температуры (через значение температурной функции s).

циклов. Ничего нового здесь нет — автор находится на уровне современной ему техники ¹⁾, ограничиваясь лишь паровыми машинами, не касаясь в отличие от Карно других типов тепловых двигателей; не упоминает он и о возможности существования обратных циклов, отмеченной Карно.

Однако самое главное, что упустил Клапейрон, — это сомнения в правильности вещественной теории тепла, явно выраженные Карно в двух местах своей работы. Не заметил он также и различие в терминах “chaleur” и “calorique”. Карно, как стало потом известно из неопубликованных рукописей, сразу же двинулся дальше, отверг вещественную теорию тепла и подсчитал его механический эквивалент. Клапейрон, напротив, так непоколебимо верил в теплород, что дважды, по выражению Энгельса, “наткнувшись носом” на механический эквивалент тепла, спокойно прошел мимо.

В первый раз это произошло, когда (в начале второго раздела своей работы) он писал о том, что “движущей силой можно образовать теплоту”. Он никак не связывает эту возможность с другой, которая с точки зрения законов сохранения напрашивается, — противоположного превращения теплоты в работу (вывод, который в аналогичной ситуации сделал Карно в “Записках”).

Еще более интересным представляется второй случай, когда он даже вывел формулу для подсчета механического эквивалента тепла, но не понял этого. Действительно, Клапейрон строго вывел уравнение, связывающее теплоемкость при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v :

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

которое он интерпретировал так: “Для равных объемов различных газов при равных давлениях и одной и той же температуре постоянная C имеет одно и то же значение; так что избыток удельной теплоты при постоянном объеме над удельной теплотой при постоянном давлении имеет одно и то же значение” ²⁾. Если бы он задумался о том, откуда эта разница теплоемкостей берется (или куда девается), он получил бы тот же результат — механический эквивалент теплоты, который до него нашел С. Карно, а после него Р. Майер, именем которого и было названо это уравнение. Самое интересное, что величина C (нужная для расчета) им была вычислена. Опять вещественная теория теплоты, крепко сидевшая в сознании Клапейрона, не позволила ему сделать всего один, но решающий шаг вперед. Все дальнейшее движение науки о теплоте и ее преобразованиях упиралось тогда в эту преграду. Ее преодолел к этому времени только один человек — Сади Карно, но его

¹⁾ Нужно ради справедливости отметить, что Клапейрон внес существенный вклад в конструирование паровых машин и получил два патента на их усовершенствование — в 1842 и 1848 гг.

²⁾ Annalen der Physik und Chemie. Hrag. von J. Poggendorf. 1843. Bd. 9/29. S. 570.

мысли были заперты в сейфе Ипполита Карно, и никто о них не знал. Между тем движение науки требовало решения этой задачи.

Повторное открытие Первого начала и его утверждение

Один из удивительных на первый взгляд парадоксов истории термодинамики состоит не только в том, что Первое начало, по существу более простое для понимания, чем Второе, было установлено после Второго; еще более удивительно, что оно встретило вначале не просто непонимание, а ожесточенное сопротивление. Ученым никак не удавалось преодолеть психологический барьер, созданный глубоко укоренившимися калориметрическими представлениями — удобными и ясными. Этот барьер в 30-е годы не смог преодолеть даже Клапейрон, не говоря уже о других физиках. Даже У. Томсон в 40-ые годы преодолел его не сразу. Только С. Карно раньше всех со свойственной гениям смелостью не побоялся “потрясения основ” и сформулировал это положение как естественный вывод из многократно наблюдаемых явлений. И может быть, ранняя смерть уберегла его от таких ударов, которые пришлось перенести Р. Майеру, когда в 40-ых годах он пытался убедить ученый мир в справедливости закона сохранения энергии.

Характерен пример борьбы с Майером того самого И. Поггендорфа, который так похвально отозвался о работе Клапейрона и издал в 1843 г. ее немецкий перевод. Поскольку Поггендорф и как физик, и как издатель сыграл существенную роль в длительном неприятии положения об эквивалентности тепла и работы, нужно сказать о нем несколько слов. Он прожил долгую жизнь (родился в 1796 г. и был, следовательно, ровесником С. Карно, а умер в 1877 г.). Поггендорф начал свою карьеру аптекарем; в 1824 г. окончил Берлинский университет, с 1834 г. стал его профессором; с 1839 г. — член Берлинской академии наук, с 1868 г. — Петербургской. Работал в области электромагнетизма и занимался историей физики. В 1824 г. он основал и затем бесценно редактировал авторитетный журнал “*Annalen der Physik und Chemie*”, в котором и была опубликована статья Клапейрона. С 1863 г. он также издавал справочник, содержащий биографические сведения о деятелях науки и библиографию. Быть напечатанным в журнале Поггендорфа считалось большой честью, и, напротив, отказ в публикации означал, что работа недостаточно серьезна.

Роберту Майеру (1814–1878) вполне заслуженно (поскольку он все сделал независимо от С. Карно) принадлежит приоритет как в вычислении механического эквивалента теплоты, так и в первой, основанной на этой эквивалентности общей формулировке закона сохранения энергии. Поггендорф был первым физиком, которому судьба предоставила возможность увидеть работу Майера и оценить ее революционную роль.

Майер, будучи судовым врачом и путешествуя в тропиках, обнаружил при операциях, что у жителей острова Ява венозная кровь намного

светлее, чем у европейцев. Ему было известно (это установили еще Лавуазье и Лавуазье), что тепло, выделяемое живым организмом, получается в результате окисления пищи кислородом. Размышляя об этом, Майер нашел совершенно правильное объяснение: в жарком климате организму нужно вырабатывать меньше тепла. Следовательно, артериальная кровь, переходя в венозную, должна меньше темнеть (т. е. отдавать меньше кислорода). Это была глубокая и новая мысль. Но Майер пошел дальше и сделал решающий шаг — он связал окисление пищи не только с выделяющимся теплом, но и с работой, которую производит организм. Следовательно, решил он, тепло и работа происходят из одного источника и могут взаимно превращаться; при одном и том же количестве окисленной пищи их сумма неизменна.



Рис. 26. Р. Майер

Эта мысль однозначно вела к отказу от вещественной теории тепла. Майер это сделал в очень четкой и безапелляционной форме: “Выскажем великую истину: никаких нематериальных материй не существует. Мы прекрасно сознаем, что ведем борьбу с укоренившимися и канонизированными крупнейшими авторитетами гипотезами, что мы хотим вместе с невесомыми жидкостями изгнать из учения о природе все, что осталось от богов Греции”¹⁾. И статью, содержащую такие крамольные и непочтительные мысли, в которой к тому же не было ни одной математической формулы, Майер в 1841 г. направил в самый уважаемый физический журнал “*Annalen der Physik und Chemie*”.

Поггендорф не использовал возможности стать “крестным отцом” закона сохранения энергии; напротив, он ничего не понял, в очень резкой форме отказался ее публиковать и вернул автору. Майера это не остановило. Он еще поработал над статьей, добавив в нее уже расчет механического эквивалента теплоты (365 кгм/ккал, который он потом уточнил до 425 кгм/ккал). Определена эта величина была по той самой формуле для $c_p - c_v$ (названной впоследствии формулой Майера), которую после Карно вывел, но не использовал Клапейрон. Ход рассуждений Майера был гениально прост: “Если тепло, которое

¹⁾ Цит. по: *Гельфер Я.М.* История и методология термодинамики и статистической физики. М.: Высшая школа, 1981. С. 142. По силе “антитепелородных” выражений этот отрывок можно сравнить только со словами М. В. Ломоносова из “Рассуждений о причине тепла и холода” (1744 г.): “Это мнение в умах многих пустило столь глубокие корни и настолько укрепилось, что повсюду приходится читать в физических сочинениях то о внедрении в поры тел теплотворной материи, как бы привлекаемой каким-то приворотным зельем ... то о бурном выходе ее из пор, как бы объятаю ужасом...” (*Ломоносов М.В.* Полн. собр. соч. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. 2. С. 93).

получает газ, нагреваясь при постоянном объеме до t° , равно x , а тепло, необходимое газу для такого же повышения температуры при постоянном давлении равно $x + y$ и если далее вес, поднятый в этом последнем случае, равен p , а высота подъема h , то $y = ph$ "¹⁾. Пользуясь данными Деляроша, Берара и Дюлонга по свойствам газов, легко подсчитать все эти величины.

Новый вариант работы Майер направил в другой, менее авторитетный и известный журнал "Annalen der Chemie und Pharmacie", где она и была опубликована. В дальнейшем Майер распространил закон сохранения и на химические, и на электрические "силы".

Известно, что работы Майера не были оценены его современниками; более того, враждебное отношение довело его даже до попытки самоубийства (в 1850 г.); около года (1853–1854) он провел в больнице. Поггендорф не изменил отношения к Майеру и намного позже, когда его правота уже была признана. В выпуске биографического словаря 1863 г. справка о Р. Майере заканчивалась так: "...кажется, в 1858 г.

умер в сумасшедшем доме". Но в добавлениях в конце словаря сделано примечание: "не умер ... но еще жив".

Только после опубликования опытов Джоуля (в них была реализована идея с мешалкой (рис. 24) — та же, которую предложил С. Карно в своих "Записках"), трудов Гельмгольца закон эквивалентности теплоты и работы, а затем и в более общей форме как закон сохранения энергии был признан ученым миром. Это произошло окончательно в 50–60-ые годы, т. е. примерно через

Рис. 27. Схема опыта Джоуля для измерения механического эквивалента теплоты. 1 — сосуд с вращающейся мешалкой, заполненный водой; 2 — термометр; 3–4 — грузы, вращающие мешалку; 5 — вал мешалки

три-четыре десятилетия после того, как С. Карно сформулировал его впервые.

В чем же причина столь мучительного и трудного принятия физиками представления об эквивалентности тепла и работы?²⁾ Ведь

¹⁾ Там же. С. 141.

²⁾ Интересно отметить, что при всем этом в инженерной среде представления об эквивалентном превращении теплоты в работу возникали под влиянием практических наблюдений. Так, французский инженер Сегэн писал в 1839 г.: "...определенное количество калорий исчезает в самом акте производства механической силы, и обратно", и "оба явления связаны между собой

даже идеи Карно, обработанные Клапейроном, которые более сложны по своему физическому содержанию (как и вообще второе начало, основание которого они заложили), не встретили такого ожесточенного сопротивления.

Основная причина здесь, по-видимому, состоит в том, что вещественная теория тепла, укоренившаяся в представлениях ученых, могла быть менее болезненно низвергнута, если бы механические представления о теплоте тоже были бы выражены какой-либо количественной теорией, связывавшей движения молекул с теплотой. Но молекулярно-кинетическая теория в форме статистической механики развилась и утвердилась гораздо позднее, к концу XIX века, и тоже в трудной и драматичной борьбе, которая привела, как известно, даже к самоубийству одного из ее основоположников — Л. Больцмана. Взрывная сила постулатов Карно (из которых вышло второе начало со всеми его сложностями) и у него, и у Клапейрона в то время была скрыта удобной и понятной гидравлической аналогией, которая воспринималась относительно легко. Постулаты могли признаваться или не признаваться, они не “потрясали основ” и соответственно не вызывали такого ожесточенного отпора, тем более что вполне укладывались в постулат о сохранении тепла.

В начале 40-х годов вещественная теория, уже значительно поколебленная, получила неожиданную поддержку. Петербургский профессор Герман Иванович Гесс (1802–1850), исследуя термохимические явления, открыл закон, впоследствии названный его именем; впервые он опубликовал его в 1838 г. В окончательной форме этот закон постоянства сумм тепла в той форме, в которой он был доложен на заседании Петербургской Академии наук в 1840 г., гласил: “Когда образуется какое-либо химическое соединение, то при этом выделяется одно и то же количество тепла независимо от того, происходит ли образование этого соединения непосредственно или же косвенным путем и в несколько приемов”. Чем не идеальное подтверждение вещественной теории тепла? Сам Гесс придерживался именно такой трактовки — о “неуничтожимости теплового вещества”. Мысль о превращении химической энергии в тепло и работу и зависимости этих эффектов от температуры и давления с соблюдением законов сохранения еще не возникла.

Но “крот истории” и тут неумолимо делал свое дело, и вещественная теория тепла доживала последние годы (если не считать коротких рецидивов, лежащих вне серьезной науки), уступая место механической теории тепла. Это происходило даже без завершённой теории, описывающей внутренний молекулярный механизм преобразования тепла в работу. К началу 50-х годов механическая теория была признана.

Но тут же возникла новая, принципиальная трудность — как совместить постулаты Карно с эквивалентностью теплоты и работы? Ведь,

условиями, которые делают неизменными их взаимные соотношения...” (Цит. по: *Гельфер Я.М.* Указ. соч. С. 135).

по книге Карно (и соответственно по Клапейрону), тепло в неизменном количестве переходит с верхнего температурного уровня на нижний. Но если учесть эквивалентное превращение, то на нижний уровень придет только часть тепла! И вообще, зачем этот нижний температурный уровень? Почему все тепло в соответствии с эквивалентом не может перейти в работу? Как ввести все эти взаимоисключающие положения в рамки одной общей теории? Многие, в том числе Джоуль, под давлением этих кажущихся противоречий предлагали даже вообще отказаться от теоремы Карно. Об этом “смутном времени” А. Пуанкаре писал: “Когда было установлено, что теплота не обладает свойством неунитожимости, но что она может быть преобразована в работу, идеи Карно были совершенно оставлены”¹⁾.

Здесь необходимо отметить, что сам С. Карно, как видно из его “Записок”, нигде не противопоставляет существование открытого им механического эквивалента теплоты своим прежним выводам, основанным на сохранение теплорода (*calorique*). У него нигде даже не проскальзывает мысль о каком-либо противоречии; для него оно просто не существует. Это еще раз показывает, что под термином “*calorique*” он понимал нечто другое, в условиях рассматриваемой им модели неизменное и отличное от понятия “теплота” (*chaleur*), которая, напротив, должна расходоваться. Но развить эти мысли он не успел...

Решить задачу соединения положений Карно из его “Размышлений...” и положения об эквивалентности теплоты и работы и тем самым создать основу современной термодинамики наука Франции не смогла; ее представители и через три десятилетия не вышли на уровень мышления Карно. Поэтому она остановилась на том рубеже, которого достиг Клапейрон.

Как это не раз бывало в истории науки, задержка ее развития в одном месте приводит к “прорыву” в другом. Так произошло и здесь. Центр тяжести исследований “движущей силы тепла” переместился в Англию и Германию. Решить задачу создания общей теории удалось англичанину У. Томсону (Кельвину) и немцу Р. Клаузиусу.

Каждый из них шел своим путем, несколько отличавшимся от того, который наметил С. Карно. В наиболее законченном виде объединить закон сохранения и постулат Карно удалось Р. Клаузиусу. В результате появились первое и второе начала термодинамики, объединенные в одну общую систему. В дальнейшем, однако, оказалось, что содержание второго начала достаточно сложно и в нем соединены два существенно различных постулата, каждый из которых будет иметь свою линию развития.

¹⁾ Там же. С. 167.

Синтез второго и первого начал в работах У. Томсона и Р. Клаузиуса. “Раздвоение” второго начала

Прежде чем перейти к изложению развития Томсоном и Клаузиусом идей Карно, вспомним некоторые данные из их биографий и отметим особенности их творчества, имеющие отношение к этой части их деятельности.

У. Томсон родился в 1824 г., как раз в то время, когда вышла книга Карно. Окончил Кембриджский университет. Многие годы (с 1846 г., когда ему было всего 22 года, по 1899 г.) заведовал кафедрой физики университета Глазго. За научные заслуги получил в 1892 г. титул лорда Кельвина. Член Лондонского королевского общества с 1851 г. (президент в 1890–1895 гг.), иностранный член Петербургской Академии наук (с 1896 г.). Умер в 1907 г.

Для Томсона характерна необычная широта интересов. Кроме термодинамики, он занимался гидродинамикой, электромагнитными явлениями, механикой, оптикой, математикой, техникой... Известны несколько “эффектов Томсона”, “формул Томсона”. Кроме всего этого, он создал множество инженерных конструкций.

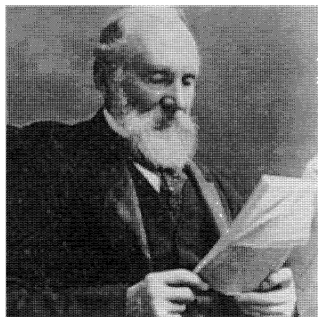


Рис. 28. У. Томсон (Кельвин)

Первые работы Томсона, с которых начинался новый этап в развитии науки о тепле и превращение ее в термодинамику, как видно не только по их содержанию, но и по названиям, продолжали то, что начал С. Карно. Томсон, как впоследствии и Клаузиус, пользовался вначале для работы статьей Клапейрона; найти книгу Карно было почти невозможно. В 1845 г., во время пребывания в Париже, Томсон безуспешно пытался найти труд С. Карно у книгопродавцев. Он описывал свои злключения так: “Я посещал каждую книжную лавку, какую я только мог разыскать, и спрашивал: “Карно, движущая сила огня”. — “Каино? Я не знаю этого автора.” С большим трудом мне удалось объяснить, что я произношу “р”, а не “и”. — “А, Кар-р-р-но! Да, вот его книга.” — И продавец протягивал мне томик по социальным вопросам, написанный Ипполитом Карно (младшим братом С. Карно), но “Движущая сила огня” была совершенно неизвестна» ¹⁾.

Первые работы Томсона, с которых начинался новый этап в развитии науки о тепле и превращение ее в термодинамику, как видно не только по их содержанию, но и по названиям, продолжали то, что начал С. Карно. Томсон, как впоследствии и Клаузиус, пользовался вначале для работы статьей Клапейрона; найти книгу Карно было почти невозможно. В 1845 г., во время пребывания в Париже, Томсон безуспешно пытался найти труд С. Карно у книгопродавцев. Он описывал свои злключения так: “Я посещал каждую книжную лавку, какую я только мог разыскать, и спрашивал: “Карно, движущая сила огня”. — “Каино? Я не знаю этого автора.” С большим трудом мне удалось объяснить, что я произношу “р”, а не “и”. — “А, Кар-р-р-но! Да, вот его книга.” — И продавец протягивал мне томик по социальным вопросам, написанный Ипполитом Карно (младшим братом С. Карно), но “Движущая сила огня” была совершенно неизвестна» ¹⁾.

Первая работа Томсона на эту тему называлась “Об абсолютной термодинамической шкале температур, найденной из теории Карно о движущей силе огня и вычисленной из данных Ренью” (1848), вторая — “Доклад о теории Карно о движущей силе теплоты с численными

¹⁾ Цит. по: *Кричевский И.Р.* Понятия и основы термодинамики. М.: Химия, 1979. С. 172.

результатами, полученными из наблюдений Реньо над водяным паром” (1849). Опыты Реньо Томсон хорошо знал, так как в 1845 г. работал в его лаборатории.

В первой из названных работ Томсон изложил результаты использования идей Карно (которые повторил и Клапейрон) для установления новой, названной им *абсолютной* шкалой температур.

Все существовавшие к тому времени температурные шкалы были чисто эмпирическими. Для измерения температуры использовалось тепловое расширение тел — газообразных или жидких, причем две опорные точки шкалы, как и число градусов, на которые делился промежуток между ними, назначались произвольно. У Цельсия и Реомюра это были точки таяния льда и кипения воды (промежутки соответственно делился на 100 и 80 градусов). Фаренгейт был наиболее оригинален как в выборе точек, так и в назначении соответствующих им градусов. Для нижней точки шкалы он выбрал температуру смеси тающего льда с нашатырем (NH_4Cl). Это соответствует $-17,8^\circ\text{C}$. (Фаренгейт по-видимому считал, что более низкие температуры на практике не встречаются.) Для верхней точки шкалы он сначала принял температуру человеческого тела, положив ее за 100° ¹⁾. Выбор цифрового значения реперных точек и величины градуса был в конце концов вопросом второстепенным и определялся только удобством. Важнее было другое: все эти шкалы зависели от коэффициента линейного расширения термометрического вещества (который был неодинаков не только у разных веществ, но и у одного и того же вещества в разных условиях). Поэтому мечтой физиков стало нахождение “истинной” температурной шкалы, но они не понимали, что установить ее на основе использования свойств реальных веществ в принципе невозможно.

Томсон понял раньше других, что работа Карно дает возможность полностью абстрагироваться при установлении температурной шкалы от термометрического вещества. Действительно, по Карно, *“движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми производится перенос теплорода”*²⁾. Далее Карно оговаривает, что это положение, говоря современным языком, относится только к идеальным, квазистатическим процессам (по Карно, *“достигающим полного совершенства”*). Следовательно, если построить температурную шкалу на основе “движущих сил” (т.е. работ) циклов Карно в определенных интервалах, то она никак не будет зависеть от свойств вещества. Естественно, что для расчета этих количеств работы и сравнения их с газовой шкалой необходимы данные по свойствам газов (об этом писал и Карно).

¹⁾ Позднее он, учитывая непостоянство этой температуры, заменил ее: в качестве верхней точки шкалы была принята температура кипения воды при атмосферном давлении — 212° .

²⁾ Карно С. Размышления о движущей силе огня... // Второе начало термодинамики. М.-Л.: ГТТИ, 1934. С. 30.

У Томсона эта мысль четко выражена. “Вполне удовлетворительный расчет предлагаемой шкалы можно осуществить только после получения дополнительных экспериментальных данных; те же данные, которыми мы располагаем в настоящее время, позволяют провести более или менее удовлетворительно сравнение настоящей шкалы со шкалой воздушного термометра в интервале температур от 0 до 100°С”¹⁾. Эта шкала вошла в науку и практику как “шкала Кельвина”, окончательно утвержденная намного позже — в 1954 г.

Несмотря на то, что эта работа Томсона опиралась еще на вещественную теорию тепла и давала нужный результат без ее отмены, она подвела вплотную к мысли о пропорциональности количества тепла в циклах абсолютной температуре и тем самым наталкивала на мысль о ее механической природе.

Вторая из упомянутых работ Томсона тоже опиралась на мемуар Карно, но цель у нее была другая, более трудная — увязать теорию Карно с положением о превращении тепла в работу. К этому времени Томсон уже знал об опытах Джоуля (они впервые встретились в Оксфорде в 1847 г). Статья Томсона носит постановочный характер; решить задачу он еще не смог — только сформулировал ее, что тоже было достаточно сложно. Он сделал это позже в результате двухлетней работы, но Клаузиус опередил его, решив основную задачу в 1850 г. В дальнейшем и тот, и другой подробнее развили свои идеи, но основы, причем несколько по-разному, были заложены ими именно в это время. Наиболее полно и последовательно разработал основы второго закона термодинамики Клаузиус.

Р. Клаузиус (1822–1888) закончил Берлинский университет, после чего стал преподавать в Артиллерийской школе, а затем последовательно занимал кафедры в Цюрихе, Вюрцбурге и Бонне. В отличие от Томсона он, если не считать ряда менее значительных работ по электродинамике, всю жизнь посвятил термодинамическим исследованиям и создал стройную систему знаний, почти полностью вошедшую в фундамент этой науки.

Для Клаузиуса характерны глубина, основательность и четкое математическое оформление выдвигаемых положений. Романтические взлеты фантазии и далекие экстраполяции ему не свойственны. Единственное отступление он допустил, как известно, распространив принцип возрастания энтропии на всю Вселенную (“энтропия Мира стремится к максимуму”). Это отступление оказалось неудачным и не было принято наукой, хотя к аналогичной мысли пришел и У. Томсон, правда в менее категоричной форме.

Первая опубликованная работа Клаузиуса, в которой он соединил теорию Карно и принцип эквивалентности тепла и работы, называлась “О движущей силе тепла и законах, которые можно из нее получить для теории тепла” и была доложена им в Берлинской академии наук в феврале 1850 г. Достаточно точную оценку этой работы сделал сам

¹⁾ Цит. по: *Гельфер Я.М.* История и методология... С. 155.



Рис. 29. Р. Клаузиус

Клаузиус уже в 70-х годах на страницах своего обобщающего труда “Механическая теория тепла”: “В этом сочинении я исследовал, не дожидаясь предварительных экспериментов, те, указанные У. Томсоном, трудности, которые возникают при согласовании идеи Карно с новой теорией тепла... Я указал там, каким образом необходимо изменить фундаментальные понятия и все математическое обоснование теории тепла, если принять положение об эквивалентности тепла и работы, а также показал, что теорию Карно не следует целиком отбрасывать, а что ее можно обосновать на иного рода положении, которое позволяет объ-

единение основного положения Карно с положением об эквивалентности тепла и работы.

Все это позволяло построить основы новой теории, которую я развил специально для идеальных газов и насыщенных паров и получил ряд уравнений, имеющих общее значение”¹⁾.

Принцип эквивалентности тепла и работы он излагает почти буквально теми же словами, что и Карно в “Записках”, исключая разницу в терминах (“работа” у Клаузиуса вместо “движущая сила” у Карно): “Во всех случаях, когда с помощью теплоты получается работа, то произведенная работа пропорциональна затраченному количеству теплоты; и обратно — затратив такую же работу, мы получим пропорциональное количество теплоты”²⁾.

Содержание и результаты последующих работ Клаузиуса, объединенных им в фундаментальном труде “Механическая теория тепла”, первое издание которого увидело свет в 1867 г., вошли в той или иной мере во все учебники термодинамики и достаточно хорошо известны.

Чтобы представить более полно, как Клаузиус использовал наследство, оставленное Карно, и в чем его подход к этому наследству отличался от подхода Томсона, обратим внимание на два принципиально важных вопроса: аксиоматическое обоснование и способы доказательства теоремы Карно и введение понятия энтропии, его истоки и трактовка. Оба вопроса относятся ко второму началу термодинамики; представление об эквивалентности тепла и работы, из которого вышло первое начало, после его принятия само по себе особых трудностей не вызывало.

¹⁾ Там же. С. 160.

²⁾ Там же.

Первый вопрос связан с тем, какой постулат положить в основу доказательств теоремы Карно. Сам он взял для этой цели, как известно, положение о невозможности вечного двигателя (постулат исключительно *perpetuum mobile*).

Клаузиус сделал иначе: он выдвинул так называемую тепловую аксиому: “Теплота не может сама собой переходить от более холодного тела к телу более тепловому”. Центральный пункт этого определения — слова “сама собой”, которые означают, что для проведения такого процесса необходима компенсация, например в форме затраты работы.

Томсон предложил другую аксиому: “Невозможно осуществить машину, производящую механическую работу за счет охлаждения какой-либо массы вещества путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов” (эту мысль Томсона еще короче выразил А. Пуанкаре: “Невозможно привести в действие термическую машину при помощи только одного источника тепла”). Очевидно, что по существу постулат Томсона не отличается от принципа Карно. Поэтому, как заметил И. Р. Кричевский, правильно называть это положение постулатом Карно—Томсона.

Оба постулата — и Клаузиуса, и Карно—Томсона, — как известно, логически связаны между собой, и признание любого из них неизбежно влечет за собой и признание справедливости другого. При этом, однако, нельзя не видеть существенной разницы между ними, которая имеет принципиальное значение. Постулат Клаузиуса вводит в науку, занимающуюся с обобщенных позиций преобразованием энергии, идею односторонней направленности процессов, которая находилась вне концепции Карно. Такая идея широко использовалась и ранее, но только по отношению к непреобразуемым потокам энергии (например, поток тепла у Фурье). Другими словами, Клаузиус вводит в круг рассмотрения понятие необратимости процессов.

Постулат Томсона, напротив, никак не связан с представлением об одностороннем направлении процессов: он всецело лежит в кругу представлений об обратимости. Томсон не отходит от них и тогда, когда доказывает свой постулат “от противного”, показывая, к чему приведет отказ от нее. “Если бы мы не признали эту аксиому действительной при всех температурах, нам пришлось бы допустить, что можно привести в действие самостоятельно действующую машину и получить путем охлаждения моря или земли механическую работу в любом количестве вплоть до исчерпания всей теплоты (т. е. внутренней энергии — *В. Б.*) суши и моря или в конце концов всего материального мира”¹⁾.

¹⁾ *Гельфер Я. М.* История и методология... С. 181. Томсон не учитывал здесь того обстоятельства, что полученная работа раньше или позже диссипирует и в виде тепла возвращается в охлаждаемую среду, так что получается некоторый “круговорот энергии”. Это, разумеется, не отменяет невозможности такого процесса.

Таким образом, Томсон, как и Карно, отчетливо понимая, что неравновесность процессов в реальной жизни существует и заслуживает изучения, все же ограничивает рассмотрение энергетических превращений только равновесными процессами, вынося необратимость за пределы рассматриваемой теории. Это, естественно, никак не исключало необходимости исследований неравновесных процессов, но уже в рамках другой теории. Томсон, как известно, и в этой области получил важные результаты (в том числе, открытие двух “эффектов Томсона” и “эффекта Джоуля—Томсона”).

Обе аксиомы — и Клаузиуса, и Томсона — дали возможность найти связи принципа Карно с представлением об эквивалентности теплоты и работы и открыли путь для дальнейшего развития термодинамики. Кроме того, они, так же как и постулаты, предложенные впоследствии (К. Каратеодори, Н. Н. Шиллером, Т. А. Афанасьевой-Эренфест и др.), углубили и расширили представления об абсолютной температуре, энтропии и условиях преобразования тепла в работу. Вместе с тем вопрос о том, какой из постулатов положить в основу доказательства теоремы Карно, перестал с современной точки зрения, быть принципиально важным. Он перешел в область методики изложения термодинамики, поскольку в конечном счете независимо от того, какая аксиома принята, единственным доказательством теоремы Карно, остается эксперимент, практика. Именно она, как “пробный камень диалектики”, по известному выражению Энгельса, определяет пригодность любой аксиомы.

На первое место в процессе развития термодинамики выходит второй вопрос, связанный с различием подходов Клаузиуса и Томсона к идейному наследству Карно. В конечном счете вопрос сводится к трактовке важнейшего понятия, введенного Клаузиусом — энтропии. С точки зрения истории, при анализе этого вопроса, нельзя упускать из виду и несомненную связь (о которой уже говорилось выше) понятий “энтропия” Клаузиуса и “калорик” (*calorique*) в том смысле, в котором его использовал Карно.

Сопоставляя энтропию и “калорик”, можно сказать, что Клаузиус, как физик и математик высокого класса, сумел извлечь из мемуара Карно энтропию, которая скрывалась там под именем “калорик”¹⁾, и придать ей более широкий смысл, рассматривая ее постоянство в обратимых процессах как частный случай.

Поскольку в системе представлений Клаузиуса основой служит “неравновесная” аксиома, то полученная им классическая формула

$$dS \geq dQ/T$$

¹⁾ Для раскрытия этой “конспирации” можно провести предложенный А. А. Гухманом “следственный эксперимент” — заменить в мемуаре Карно слово “калорик” (но не *chaleur* — “тепло”) на энтропию. Ни в одном месте логика изложения не нарушится; получится звучащий почти по-современному текст.

отражает в конечном счете представление о том, что возрастание энтропии в необратимых процессах (знак неравенства) — главное в ее свойствах, а постоянство (знак равенства) — частный (хотя и важный) случай. Отсюда и две знаменитые словесные формулы. Первая принадлежит Клаузиусу: “Энергия мира постоянна, энтропия мира стремится к максимуму”; вторая — Планку: “С необратимостью (т. е. с возрастанием энтропии — *В.Б.*) стоит и падает вся термодинамика”.

Вторая формула четко отражает позицию и Планка, и Клаузиуса. Что касается первой, вызвавшей большую дискуссию, то она показывает, насколько ее автор, несмотря на профессорскую строгость мышления, увлечен идеей о вселенском значении открытого им принципа. Макс Планк, смотревший на дело более трезво, написал по этому поводу: “Не имеет смысла без дальнейших пояснений говорить об энергии или энтропии мира, ибо такие величины вообще не поддаются точному определению.”¹⁾

Подход Томсона иной, хотя и он одно время увлекался теорией “тепловой смерти Вселенной”. Его точка зрения ближе к позиции Карно, который все необратимые эффекты “выносил за скобки” и рассматривал только обратимые процессы, в которых “калорик” (место которого потом заняла энтропия) сохраняет постоянное значение. Отсюда вытекает вывод: следуя Карно, нужно считать, что главное в формуле Клаузиуса — это равенство, т. е. постоянство энтропии в обратимых процессах. Другими словами, это утверждение о существовании некоторой величины (“калорик”, энтропия), сохраняющей постоянное значение в любых обратимых тепловых процессах²⁾. В таких процессах ее изменение всегда может быть строго вычислено, что позволяет получить о них существенно важную информацию. Вместе с тем расчеты и анализ реальных процессов, происходящих в технических и биологических объектах, требуют и количественного учета роста энтропии в необратимых процессах. Для этого, естественно, могут быть использованы как эксперимент, так и расчеты на базе других, отличных от термодинамики наук (статистическая механика, гидрогазодинамика, теория тепломассообмена). Результаты, полученные таким путем, в соединении с аппаратом классической термодинамики позволяли (и позволяют) решать большой массив теоретических и прикладных задач.

Вместе с тем нарастала и необходимость в научной базе для непосредственного определения необратимых эффектов (выражаемых через рост энтропии). Такая база появилась в виде новой науки со своим самостоятельным аппаратом, получившей название “термодинамика необратимых процессов”.

¹⁾ Там же. С. 183.

²⁾ Возможно, что, если бы вместо придуманного Клаузиусом термина “энтропия” (обращение внутрь), мало что выражающего, для обозначения величины S использовался бы термин “калорик”, более близкий к смыслу этого понятия, то мучения изучающих термодинамику уменьшились.

Таким образом, произошло “раздвоение” единой науки термодинамики на два направления. Оба они, естественно, базируются на первом начале термодинамики — законе сохранения энергии; однако из второго начала каждая берет свое и делает акцент на “своей” части: первая, классическая — на принципе постоянства энтропии, вторая — на принципе ее возрастания. Второе направление прогрессирует очень бурно; однако и первое — классическая термодинамика — тоже продолжает совершенствоваться, и в ней возникают новые методы ¹⁾.

Нужно отметить возникающие время от времени попытки “срастить” в единую науку классическую термодинамику и термодинамику необратимых процессов. Такое слияние не может породить ничего другого, кроме некоторого подобия сиамских близнецов, неприспособленного к полноценной жизни. По существу дела лучше иметь две родственные, но самостоятельные науки, свободно развивающиеся в тесном взаимодействии, но каждая по своим специфическим законам.

Итоги развития классической термодинамики в XX веке и анализ влияния на них традиций, идущих от Карно, позволяют произвести заключение достаточно полную оценку его вклада в науку.

¹⁾ *Бродянский В.М.* Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития // Изв. РАН, сер. Энергетика. 2001. № 5. С. 17–43.

Глава 6

Сади Карно и термодинамика XX века

Развитие классической термодинамики во второй половине XX века

Два направления развития науки об энергии — классическая термодинамика и термодинамика необратимых процессов — каждое по-своему опираются на ключевое понятие — энтропию. Тем самым они уходят корнями в XIX век, в труды Карно, Томсона (Кельвина) и Клаузиуса.

Первое направление, представляющее по существу так называемую классическую термодинамику, опирается во втором законе как на равенство $dS = dQ/T$, так и на неравенство $dS \geq dQ/T$, но количественно не определяет этого неравенства.

В этом направлении, непосредственно продолжающем идущие от Карно традиции, точные количественные решения задач, связанных с преобразованиями энергии, могут быть получены только на основе уравнений, относящихся к обратимым процессам. Это означает, что с их помощью не могут быть количественно определены какие-либо значения возрастания энтропии, связанные с необратимостью процессов. Несмотря на такое ограничение, аппарат классической термодинамики располагает огромными возможностями, позволяющими решать множество задач из самых различных областей науки и техники, связанных с величинами самой разной физической природы. Это объясняется не только предельной обобщенностью этого направления термодинамики, но и тем, что ее методы могут быть применены и к необратимым процессам. Речь в этом случае идет, естественно, не о вычислениях необратимых эффектов, а об определении возможного направления процессов, поскольку те, при которых энтропия термически изолированной системы уменьшается, невозможны.

Кроме того, классическая термодинамика может многое дать и при анализе самих необратимых процессов, но при одном важном, абсолютно обязательном условии. Оно заключается в том, что необходимая информация о необратимых эффектах привлекается извне. Она может быть получена либо экспериментально, либо теоретически на базе других наук — статистической механики, молекулярной физики, гидрогазодинамики, теории тепломассообмена и т. д. Начало такому сочетанию тоже положил С. Карно, сопоставляя показатели идеального цикла с реальными, полученными на практике результатами.

Развиваясь на этом пути, классическая термодинамика за полтора столетия, прошедших с момента ее зарождения (точной отсчета,

несомненно, должен служить 1824 г.), пополнилась многими новыми достижениями.

Основное фундаментальное уравнение термодинамики, объединяющее первое и второе начала,

$$dU = T dS - p dV,$$

пригодное только для термомеханических систем, пополнилось новыми членами, отражающими энергетические взаимодействия другого рода, отличные от тепловых и механических. Решающий шаг в этом направлении сделал У. Гиббс, который ввел в 1875 г. в круг рассматриваемых энергетических взаимодействий химические, связанные с переносом массы. Произведение химического потенциала μ на dM (элементарное изменение массы), μdM , вошло в правую сторону основного уравнения термодинамики, которое приняло вид

$$dU = T dS - p dV + \mu dM.$$

Это дополнение означало, что родилась новая, химическая термодинамика, вошедшая в классическую термодинамику как неотъемлемая ее часть. Нельзя не отметить и другую крупную заслугу У. Гиббса — введение в термодинамику особого вида “термодинамических” потенциалов — функций, которые показывают работы различных обратимых процессов в заданных условиях. Основанный на использовании таких функций метод потенциалов позволил в большинстве случаев успешно заменить метод циклов как инструмент термодинамического исследования.

Закон, открытый в 1906 г. В. Нернстом и названный его именем, дал возможность определять абсолютные значения энтропии. Тем самым формирование основ химической термодинамики было завершено. Закон Нернста получил статус третьего начала термодинамики.

Физические исследования и разработка технических устройств преобразования энергии, связанных не только с термическими, механическими и химическими, но и с другими взаимодействиями — электромагнитными, потребовали введения в круг рассмотрения новых величин: E (напряженность электрического поля) и H (напряженность магнитного поля). Соответственно основное уравнение термодинамики пополнилось кроме μdM еще двумя членами: $E dP$ (где P — поляризация) и $H dJ$ (где J — намагниченность) и приняло вид

$$dU = T dS - p dV + \mu dM - E dP + H dJ;$$

при учете и других взаимодействий число членов в правой части уравнения может быть увеличено. Такие сложные термодинамические системы занимают все большее место и в практике, и в теоретическом аппарате термодинамики ¹⁾.

¹⁾ См.: Сычев В. В. Сложные термодинамические системы. М.: Энергоатомиздат, 1984.

В обобщенном виде это уравнение (закон сохранения энергии в термодинамической форме) записывается так:

$$dU = \sum_{i=1}^n \zeta_i dx_i,$$

где ζ_i — обобщенная сила, а x_i — обобщенная координата для соответствующего i -го вида энергетического взаимодействия через границы системы.

Такое обобщенное рассмотрение показывает, что первый член правой части уравнения, соответствующий термическому взаимодействию, построен по тому же принципу, что и остальные. Это приводит к мысли, что, несмотря на ее особые свойства, энтропия представляет собой тоже обобщенную координату состояния системы.

Основу для такого подхода дал еще Гельмгольц, который первым высказал мысль, что разработанная Клаузиусом система обоснования второго начала может быть подвергнута критике. Он указал на то, что для определения энтропии и абсолютной температуры не нужны ни циклы, ни идеальный газ, поскольку абсолютная температура любого тела есть не что иное, как интегрирующий делитель для элементарного количества тепла. Другими словами, в выражении $dS = dQ/T$ температура T (потенциал) превращает dQ из параметра процесса в изменение параметра состояния S — энтропии, которая представляет собой координату состояния, аналогичную другим, например P или v (в терминах Карно при делении на T “chaleur” — теплота превращается в “calorique” — калорик). Это дает основание и возможность непосредственного введения в термодинамику энтропии как особой координаты состояния, соответствующей термическому взаимодействию, и возможность исследования на этой основе ее свойств, не прибегая к каким-либо аксиоматическим построениям.

Таким образом, основные положения классической термодинамики приняли законченную обобщенную форму. При всем этом она сохранила две основные особенности, идущие еще от Карно. Первая из них — глубокое концептуальное содержание, непосредственно связанное с фундаментальными законами, и относительно простой математический аппарат; вторая — тесная связь с техникой и технологией (а в последнее время и с экономикой).

При всей мощи аппарата классической термодинамики она (даже с привлечением дополнительной информации) не может в принципе решать задачи непосредственного получения количественных характеристик возрастания энтропии. Между тем необходимость непосредственного анализа и расчета существенно необратимых энергетических превращений и их воздействий в физических, технических и биологических объектах становилась все более настоятельной. Ответом на эту потребность стало возникновение нового направления развития термодинамики, основой которого послужил закон возрастания энтропии,

выражающийся неравенством

$$dS \geq dQ/T.$$

Это направление, получившее название “термодинамика необратимых процессов”, основано на специальном аппарате, позволяющем количественно определять рост, генерацию (или, как принято говорить в последнее время в литературе, “производство”¹⁾) энтропии в различных физических, технических и биологических системах и их элементах. Такой подход, далеко выходящий за рамки классической термодинамики, неизбежно требует введения в круг используемых понятий времени, которое в классической термодинамике отсутствует. Как неизбежное следствие этого, понятие “работа” уступает место понятию “мощность”²⁾.

Основная задача термодинамики необратимых процессов — ускорять скорость производства энтропии, обусловленного как преобразованиями энергии, так и процессами переноса, а также условия минимизации этой скорости. Это направление быстро развивается трудами Онзагера, Денбига, де Гроота, Дьярмати, Пригожина и др. и уже, по существу, превратилось в самостоятельную науку со своей специфической методологией и математическим аппаратом, что, однако, не мешает (а даже способствует) прогрессу и классической термодинамике.

Дело в том, что термодинамический анализ реально существующих или проектируемых технических систем (а в последнее время и биологических) основан на информации двух видов. Первый из них — это та информация, которая определяет характеристики идеальных, обратимых процессов. Ее дает классическая термодинамика. Второй вид информации — тот, который связан с необратимыми (диссипационными) эффектами. Ее дает термодинамика необратимых процессов. “Объемный”, полный термодинамический анализ нуждается в информации обоих видов. Первая дает предельные, идеальные значения величин — то, чем мы располагаем; вторая — потери, то, что мы теряем.

До разработки термодинамики необратимых процессов информация второго вида получалась в основном посредством эксперимента или расчетным путем на базе частных теорий. С развитием термодинамики необратимых процессов появилась общая научная база для количественного анализа диссипационных эффектов. Такое взаимодействие двух направлений термодинамики плодотворно прежде всего в связи

¹⁾ Термин “производство” применительно к энтропии хотя и укоренился, но не вполне подходит, поскольку производство обычно связывают с *получением* чего-то полезного, а не с потерей.

²⁾ Разумеется, если не быть формалистом, то нужно признать, что в приложениях классической термодинамики мощность используется, еще начиная с работы Карно. Однако это делается только для представления в практически удобном виде результатов или исходных данных расчетов. В основу расчета и анализа время *органически* не входит.

с тем, что термодинамика перестала работать только на теплотехнику, поскольку расширяется область ее приложений (высокие давления, низкие температуры, многокомпонентные и многофазные системы и др.). Но и сама классическая термодинамика во второй половине XX века не остановилась в своем поступательном движении; дело, начатое С. Карно, продолжает развиваться. Это развитие идет как в части совершенствования самого аппарата термодинамики, так и — в духе времени — на базе системного подхода, позволяющего достичь плодотворного сочетания термодинамики и экономики.

Центральное место здесь занял эксергетический метод, основанный на новом термодинамическом понятии — эксергии. Базой для его создания послужило дальнейшее развитие упомянутой теории термодинамических потенциалов, разработанной еще Гиббсом. Эксергетический метод предназначен для анализа, оптимизации и синтеза технических систем преобразования энергии и вещества, рассматриваемых во *взаимодействии с их окружением*.

Аппарат классической термодинамики дополняется здесь введением новых функций и параметров, связанных с необходимостью ввести в рассмотрение фундаментальные для эксергетического анализа понятия — “окружение” и “окружающая среда”. Эти понятия стали необходимыми потому, что реальные условия работы технических систем потребовали их рассмотрения не только “изнутри”, но и “снаружи” — во взаимодействии с окружением — равновесной окружающей средой и находящимися в ней объектами ¹⁾. В результате появился новый класс термодинамических функций, в состав которых входят и параметры окружающей среды; их использование существенно расширяет возможности термодинамического аппарата. Важно, что все эти функции и параметры строго детерминированы и выведены “по всем правилам” дедуктивным путем из основных законов классической термодинамики. Поэтому их нельзя рассматривать как нечто, стоящее вне ее; более того, некоторые формулы термодинамических потенциалов можно рассматривать как частный случай эксергетических функций.

Все они включают ключевое понятие “эксергия” (exergie — нем., exergy — англ.) ²⁾ — свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое (характеризуемое) количеством работы, которая может быть получена внешним приемником энергии при обратимом взаимодействии с окружающей средой до установления равновесия. Таким образом, эксергия позволяет оценить все энергетические

¹⁾ Такое расширение объекта изучения повторяет на следующем, более высоком витке термодинамической науки то, что сделал в свое время С. Карно, заставивший ее выйти за пределы цилиндра паровой машины.

²⁾ Слово “exergie” составлено из двух частей: erg — “энергия, действие” ex — “внешний”. Ранее употреблявшиеся для этой величины термины “Arbeitsfähigkeit” (нем.) — “работоспособность” и “availability” (англ.) — “пригодность” вышли из употребления.

ресурсы и процессы их преобразования единой величиной — затраченной или полученной работой, т. е. корректно свести их к единому показателю.

Очевидно, что требования к решению реальных инженерных задач не позволяют в большинстве случаев ограничиться чисто термодинамическими результатами, даже полученными с учетом окружения системы. Чтобы получить окончательные результаты, необходимо привлекать и учитывать также и технико-экономическую информацию (затраты всех видов в стоимостной форме, массовые, объемные и другие характеристики технических объектов, время и т. д.). Обычно она учитывалась на следующем этапе, после термодинамического анализа. Эксергетические методы технико-экономического анализа и оптимизации основаны на введении этих величин в рассмотрение одновременно с термодинамическими, чтобы провести полный расчет за один этап. Соответственно возникает класс смешанных показателей (удельные затраты и стоимость эксергии, удельные масса и объем, тоже отнесенные к эксергии, запас и концентрация эксергии). Такое сращивание технико-экономических и термодинамических характеристик оказалось весьма ценным для практики. Оно дало возможность наилучшим образом решать такие задачи, как объективная оценка ресурсов, нахождение “слабых мест” в сложных технических объектах и оптимизация этих объектов, определение и прогнозирование технического уровня изделий, распределение затрат в комплексных производствах, установление тарифов на энергоносители и т. д.

Развитие эксергетического метода стало результатом новых требований, отражающих в конечном счете ситуацию, сложившуюся в XX веке в связи с развитием производительных сил. Наиболее четко вытекающая отсюда задача была в обобщенном виде высказана еще в 1928 г. академиком В. И. Вернадским: “Мы не имеем еще общей единицы для количественного сравнения всех естественных производительных сил ... не можем одной единицей, например, выразить добычу металла и горючего. А между тем необходимо и возможно свести к единой единице все ... Только при этом условии можно подойти к энергетической картине окружающей человека природы с точки зрения потребностей его жизни”¹⁾.

Так более 70 лет назад была поставлена задача нахождения величины, соответствующей по своему смыслу эксергии. Термодинамика смогла решить ее.

В частности, “мимоходом” была решена и очень запутанная задача строгого научного определения понятия КПД (коэффициента полезного действия). Оно было введено в науку в конце XVIII в. Л. Карно (под названием *effet utile*), затем использовалось Навье, Понселе и Кориолисом.

¹⁾ *Вернадский В.И.* О задачах и организации прикладной научной работы. АН СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1928. С. 2.

Коэффициент предназначался для оценки эффективности механических и гидравлических машин и имел совершенно четкий и однозначный смысл. Поскольку “закон сохранения силы” (т. е. закон сохранения энергии применительно к механике) к этому времени стал общепризнанным, было очевидно, что работа на выходе любого устройства не должна превышать работу, затраченную на входе, а может только (в идеальном случае) быть ей равной. Иначе получился бы *perpetuum mobile*, невозможность создания которого была к тому времени (в 1775 г.) даже официально подтверждена Парижской академией наук¹⁾. В реальной машине вследствие трения и других потерь работа на выходе W_2 всегда будет меньше затраченной W_1 на некоторую величину потери D . Следовательно, $W_1 - W_2 = D$. Чтобы определить совершенство машины, степень ее приближения к идеалу, французские механики и ввели безразмерный коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_1 - D}{W_1} \leq 1.$$

Применительно к механике этот коэффициент, однозначно определяющий энергетическое совершенство машины, безупречно работает до сих пор.

С. Карно сделал следующий принципиально важный шаг — распространил это понятие на тепловые двигатели. В заключительной части “Размышлений о движущей силе огня...” он подсчитал на основе своей теории максимально возможную работу паровой машины для заданных температурных условий и сравнил полученную цифру с той, которую давала одна из лучших паровых машин того времени. Другими словами, он определил ее КПД на основе того же принципа, которым пользовался его отец, — сопоставления идеальной и реальной машин.

Казалось бы, что и в дальнейшем по мере развития тепловой и холодильной техники этот способ оценки эффективности останется столь же логически безупречным и будет успешно применяться. Однако на самом деле все получилось иначе.

Традиции обоих Карно — старшего и младшего — соотносить идеальный и реальный эффекты, выраженные в одних и тех же качественно однородных величинах, были забыты. С появлением многочисленных тепловых и холодильных машин стали соотносить тепло или холод с работой, или тепло одного температурного уровня с теплом другого температурного уровня и т. д. В результате появилось множество коэффициентов, никак не характеризующих термодинамическое совершенство объекта; они часто имели значение даже больше 100%. Такие коэффициенты преобразования энергии не могут, строго говоря, претендовать на название КПД (хотя в большинстве случаев их так еще называют).

Эксергетический подход ставит здесь все на место: поскольку каждый поток энергии выражается через работу, для любой самой сложной

¹⁾ Histoire de l'Académie royale des sciences. Paris: 1778. P. 65–66

системы КПД всегда сводится к отношению работ на выходе и входе. Тем самым понятию КПД возвращаются (но уже на новом, более высоком витке науки) элегантная простота и научная строгость, которые придали ему основатели.

Заканчивая этот краткий обзор, нельзя не остановиться на, казалось бы, почти невероятном для термодинамики нашего времени явлении — попытках опровергнуть более чем через 150 лет постулат Карно о необходимости двух температурных уровней для преобразования тепла в работу. Другими словами, ведется работа (и создаются соответствующие “теоретические” обоснования) по созданию вечного двигателя второго рода. Для обоснования такой возможности привлекаются самые разнообразные доводы (философские, со ссылками на Ф. Энгельса и К. Э. Циолковского, биологические процессы и даже ссылка на существование тепловых насосов, действие которых, по мнению противников постулата Карно, его опровергает). Поскольку прямые атаки на Карно и других классиков термодинамики не сулят успеха, выискиваются такие процессы (например, электрохимические, антистоксова люминесценция и т. д.), для которых, как выразился один из сторонников вечного двигателя второго рода, “Карно нам не указ”.

При всей научной несостоятельности таких антитермодинамических воззрений они завоевали своих сторонников; имеются многочисленные публикации по защите таких взглядов (правда, больше в публицистике, чем в научной литературе)¹). Естественно, что в них не приводится ни одного серьезного экспериментального или теоретического доказательства.

Вклад С. Карно в науку: оценка с позиций начала XXI века

Оценка заслуг деятелей науки претерпевает различную эволюцию, зависящую от самых разных факторов. Но чаще в истории науки встречаются три варианта.

Первый, наиболее благоприятный — большая слава при жизни и сохраняющееся надолго уважение (или даже восхищение) потомков. Такой участи удостоились многие классики науки; если ограничиться термодинамикой, то классическим примером может служить У. Томсон (Кельвин).

Второй — большая известность при жизни и полное (или почти полное) исчезновение из памяти потомков. Как правило, такой приговор истории справедлив; исключения бывают, но редко.

Третий вариант, наименее благоприятный — несправедливая (иногда пренебрежительная, а часто и связанная с преследованиями) оценка при жизни и слава, известность у потомков. При этом часто случается, что известность, а потом и слава начинаются (тоже с опозданием)

¹) См.: *Бродянский В.М.* Вечный двигатель прежде и теперь. М.: Физматлит, 2001.

не у себя на родине, а в других странах. Только позже, с большим опозданием спохватываются и соотечественники. Здесь, если опять ограничиться термодинамикой, примером может служить Р. Майер.

В значительной мере по этому третьему варианту сложилась и судьба С. Карно.

Его соотечественники, Академия наук, его родная Политехническая школа вспомнили о нем только в конце 60-х годов, когда за рубежом он уже давно был признан классиком науки, которым должна была бы гордиться Франция.

После публикаций 60-х и 70-х годов официальные научные организации опять в течение полувека никак не отмечали какие-либо даты, связанные с памятью Сади Карно. Только в 1926 г. в связи со столетием выхода в свет “Размышлений...” (но с опозданием на два года) мэрия Иври организовала совместно с Обществом гражданских инженеров Франции заседание, посвященное жизни и деятельности Сади Карно. Оно проходило в присутствии тогдашнего президента республики Гастона Думерга. На нем выступали с докладами два представителя Академии наук — Д. Бертелло (“Сади Карно и термодинамика”) и А. Ле Шателье (“Сади Карно и химическая механика”), а также один из членов семьи Карно — лейтенант-полковник Карно, рассказавший о некоторых неизвестных деталях биографии Сади.

Заключительную речь произнес министр общественных работ А. де Монзи. Говоря, в частности, о могиле С. Карно, он вспомнил по аналогии известную историю с забытой могилой Архимеда¹⁾. Этот намек, однако, не произвел должного впечатления ни на членов семьи Карно, ни на академиков, и никаких действий на могиле Сади не было предпринято.

В 1932 г. к столетию со дня смерти С. Карно, на фасаде Малого Люксембургского дворца, где он родился, была установлена мемориальная доска. Торжественная церемония проходила 8 июля в присутствии президента республики А. Лебрена и при участии представителей Сената и делегаций Академии наук и Политехнической школы. Присутствовали также члены семьи Карно. Было произнесено семь речей; в числе выступавших были Э. Пикар, Ж. Перрен и один их членов семьи Карно по имени Сади.

В 1974 г. по поводу 150-летия выхода в свет “Размышлений...” в Париже состоялась большая научная конференция, на которой были представлены многочисленные доклады, посвященные биографии

¹⁾ Ее обнаружил в 75 г. до н. э. (через 137 лет после смерти Архимеда) Марк Туллий Цицерон во время пребывания на Сицилии. Он писал об этом так: “Внимательно всматриваясь ... я заметил небольшую колонну, немного выступавшую из кустов репейника, на ней был виден рисунок шара и цилиндра. Я сказал сиракузянам ... что это, по-видимому, могила, которую я ищу ... Таким образом, в одном из самых благородных государств Эллады, некогда наиболее знаменитом по своей культуре, остался бы неизвестным памятник его гражданину, отличавшемуся наиболее глубоким умом...” (Каган В.Ф. Архимед. М.–Л.: Гостехтеоретиздат, 1951. С. 5–6).

С. Карно и его научным работам, а также дальнейшему развитию термодинамики.

Несмотря на эти эпизодические события, значение которых, разумеется, нельзя недооценивать, памяти С. Карно и его научным достижениям уделяется на его родине во Франции мало внимания. Там, в отличие от других стран, не издано ни одного серьезного исследования,

связанного с его жизнью и работой. Ни Академия наук, которая в свое время не смогла его понять, ни его alma mater — Политехническая школа ¹⁾, которая, казалось бы, должна помнить своего знаменитого выпускника, не сделали ни малейшей попытки как-то вспомнить о нем и помочь увековечить его память.

Три других выдающихся члена семьи Карно — знаменитый Лазар, “организатор победы”; Ипполит, министр и деятель просвещения, также как и другой Сади — президент Франции, похоронены с почетом в парижском Пантеоне вместе с другими выдающимися деятелями Франции. Но “первый Сади” Карно этой чести не удостоился — он не был ни министром, ни президентом. Не умаляя их заслуг (особенно Лазара Карно), нельзя с этим согласиться. Характерно, что не попал он и на плакат, прославляющий членов семьи Карно (рис. 30).

Сейчас другая, более соответствующая истине, “иерархия” наблюдается в научной литературе



Рис. 30. Французский плакат с портретами трех выдающихся представителей семьи Карно: Лазара, Ипполита и второго Сади — президента. Справа и слева — знамена Франции: на левом надпись “Victoria” (победа), на правом — “Honneur” (честь), внизу — “Patria” (родина). Первый Сади отсутствует

(в том числе и французской). В частности, это можно видеть по “цитируемости” С. Карно. В каждом курсе физики, термодинамики, теплотехники, холодильной и криогенной техники его фамилия многократно упоминается в тексте как сама по себе, так и в сочетании со словами “цикл”, “теорема”, “закон” т. д. В этом отношении он уступает, пожалуй, только “самому” И. Ньютону.

¹⁾ Политехническая школа давно уже потеряла свою былую славу. Сейчас это рядовое армейское техническое училище, ничем не выдающееся среди других французских учебных заведений такого рода.

Чтобы в полной мере оценить заслуги С. Карно перед наукой и техникой, целесообразно подытожить и свести в единый список все то, что он успел сделать за свою короткую жизнь. Такой “реестр”, позволяющий одновременно окинуть взглядом все достижения С. Карно, впервые составил в 1935 г. Б. Г. Кузнецов¹⁾. Теперь, более чем через полвека, этот список можно откорректировать и существенно дополнить. Реестр должен включать по меньшей мере десять пунктов, показывающих результаты деятельности С. Карно как физика и инженера.

1. Карно дал первую формулировку второго начала термодинамики (в виде постулата о невозможности работы теплового двигателя от одного источника тепла).

2. Карно ввел в науку общее понятие о равновесных (обратимых) и неравновесных (необратимых) процессах, включая и тепловые (до него оно существовало только для механических систем; его ввел Лазар Карно) и сформулировал условия их проведения.

3. Карно разработал общее понятие о циклах (которые впоследствии были названы термодинамическими) и изобрел первый и наиболее распространенный в теоретической термодинамике из них — цикл, впоследствии названный его именем.

4. Карно впервые выдвинул и обосновал тезис о том, что работа идеальной тепловой машины в заданных температурных условиях не зависит от природы рабочего тела.

5. Карно обосновал уравнения, определяющие связи теплоемкостей в изобарном и изохорном процессах.

6. Карно первым ввел в науку и определил количественно безразмерную величину, которая для тепловых двигателей показывает отношение полученной работы к максимально возможной в данных температурных условиях. Тем самым он распространил строго определяемое понятие КПД, тоже введенное его отцом (*effet utile*), на тепловые машины.

7. Карно впервые указал на возможность обращения теплового двигателя и создания машин, работающих по обратному циклу; тем самым он предсказал появление холодильных и теплонасосных систем, т. е. устройств, позволяющих путем затраты работы отводить от внешних объектов тепло в нижнем температурном уровне и отдавать его на верхнем.

8. Карно был одним из первых, кто четко сформулировал закон эквивалентности тепла и работы, и первым, кто достаточно точно определил численное значение механического эквивалента теплоты.

9. Карно впервые разработал программу экспериментальных исследований для точного определения механического эквивалента теплоты, а также изучения свойств реальных газов.

¹⁾ См.: История энергетической техники. Вып. 2. М.: 1935. С 17–18.

10. Карно предсказал ряд достижений теплотехники XIX и XX веков (использование водяного пара высоких параметров, развитие двигателей внутреннего сгорания, использование сбросного тепла).

Все, что перечислено в этих десяти пунктах, стало возможным только в результате того, что С. Карно ввел в науку и использовал новый, никогда до него не существовавший методологический принцип. Он заключается в изучении преобразований энергии (“силы”) *независимо и от механизма этого преобразования, и от веществ, которые для этого используются*. И, что не менее удивительно, при столь высоком уровне абстрактного мышления он ни в малейшей степени не отошел от конкретных инженерных задач; напротив, он все время связывал теорию с возможностями ее использования на практике.

В истории науки можно назвать лишь несколько имен тех, кто ввел в нее какой-либо фундаментальный закон природы, и еще меньше тех, кто открыл два таких закона.

С. Карно с полным правом входит в относительно небольшое число классиков науки, наследие которых продолжает работать в полную силу и в наши дни.

Основные даты жизни и деятельности С. Карно

- 1796 г., 1 июля** — родился в Париже, в семье Л. Карно, выдающегося французского математика, механика, военного и политического деятеля.
- 1812 г.** — поступил в Политехническую школу.
- 1814 г.** — закончил Политехническую школу. Поступил на военную службу.
- 1814–1818 гг.** — военная служба в провинции (инженер-лейтенант).
- 1818–1821** — военная служба в Париже. Посещение лекций в Сорбонне, в Горном институте.
- 1821 г.** — поездка к отцу, Л. Карно, жившему в Магдебурге после изгнания из Франции в 1815 г. Начало работы над теорией теплового двигателя (мемуар “Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу”).
- 1823 г.** — смерть отца. Завершение работы над мемуаром “Размышления о движущей силе огня...”
- 1824 г.** — опубликование знаменитого мемуара “Размышления о движущей силе огня...”, в котором впервые разработаны положения, послужившие основой для формулирования Второго начала термодинамики.
- 1826–1828 гг.** — продолжение военной службы. Научная работа по тепловым двигателям и экономике.
- 1828–1832 гг.** — работа над “Записками”, в которых впервые сформулированы основные положения Первого начала термодинамики и обширная программа экспериментальных исследований, предвосхитивших проведенные на три десятилетия позже работы Джоуля и Томсона-Кельвина.
- 1832 г., 24 августа** — скончался в больнице пригорода Парижа Иври на Сене.
- 1878 г.** — посмертное опубликование “Записок” С. Карно.
- 1976 г.** — опубликование отрывка из “Экономических заметок” С. Карно.

Список литература

Труды С. Карно

- Карно С.* Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу. М.–Пг.: Госиздат, 1923. 74 с.
- Карно С.* Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу // Второе начало термодинамики. М.–Л.: Гостехтеориздат, 1934. С. 16–62.
- Carnot S.* Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur machines propres à développer cette puissance. Paris: Bachelier, 1832. 118 p. [Photo-edition. Paris, 1953.]
- Carnot S.* Recherche d'une formule propre à représenter la puissance motrice de la vapeur d'eau (Une manuscrit inédit de Sadi Carnot) // Rev. Hist. Sci. 1966. V. 19. P. 151–166.
- Carnot S.* L'oeuvre posthume de Sadi Carnot // Ibid. 1976. P. 195–199.
- Manuscrit inédit de Sadi Carnot, concernant l'économie politique et les finances publiques // Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 389–395.

Литература о С. Карно

- Бриллоэн Л.* Термодинамика, статистика, информация // УФН. 1962. Т. 27, вып. 2. С. 337–352.
- Бродянский В.М.* Работы С. Карно: этапы их восприятия, развития и реализации в технике // Исследования по истории физики и механики. М.: Наука, 1999. С. 38–48
- Кошманов В.В.* Карно, Клапейрон, Клаузиус. М.: Просвещение, 1985. 96 с.
- Радциг А.А.* Сади Карно и его "Размышления о движущей силе огня" // Арх. истории науки и техники. 1934. Вып. 3. С. 31–50.
- Спасский Б.И., Сарангов Ц.С.* К истории открытия теорем Карно // УФН. 1969. Т. 99, вып. 2. С. 174–191.
- Фрадкин Л.З.* Сади Карно: Его жизнь и творчество, 1832–1932. М.–Л.: 1932. 56 с.
- Фрадкин Л.З.* Историческая эволюция принципа С. Карно // История техники. 1935. Вып. 3. С. 3–36.
- Франкфурт У.И.* Сади Карно // Тр. ИИЕТ. Т. 19. С. 564–582.
- Фрейх А.М.* Сади Карно — основатель термодинамики // Учен. зап. Тирасп. пед. ин-та. 1958. Вып. 7. С. 195–202.
- Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. 427 p.
- Aries A.* L'oeuvre scientifique de Sadi Carnot. Paris: 1921. 160 p.

- Barnett M.K.* Sadi Carnot and second law of thermodynamic //Osiris. 1958. V. 13. P. 327-357.
- Biographie et manuscrit S. Carnot. Paris: Gauthier-Villars, 1927. 148 p.
- Birembaut A.* A propos des notices biographiques sur S. Carnot: Quelques documents inédits //Rev. Hist. Sci. 1974. V. 27. P. 355-369.
- Birembaut A.* Sadi Carnot en son temps de 1817 á 1832 //Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 53-80.
- Centenaire du physicien Nicolas Sadi Carnot (1796-1832) //Petit Luxemburg. 1932. 8 juill.
- Chally J.F.* Carnot Nicolas Leonard Sadi //Dictionary of scientific biography. N. Y.: 1971. V. 3. P. 79-84.
- Clapeyron E.* Memoire sur la puissance de la chaleur //J. école roy. politechn. 1834. T. 14, cah. 23.
- Clapeyron E.* Uber die bewegende Kraft der Wärme //Ann. Phys. und Chem. 1843. Bd. 59/29. S. 446-467, 566-586.
- Clausius R.* Die mechanische Wärmetheorie. Braunsweig: 1876. 352 S.
- Decombe L.* Sadi Carnot et le principe de l'équivalence //C. r. Acad. sci. 1919. T. 168. P. 268-271.
- Fox R.* Watts expansive principle in the work of Sadi Carnot and Nicolas Clement //Notes and Rec. Roy. Soc. London. 1970. V. 24. P. 233-253.
- Gillispie C.C.* The scientific work of Lazare Carnot and its influence on that of his son //Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 23-34.
- Girard P.S.* Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur machines propres á développer cette puissance; par S. Carnot //Rev. Encycl. 1824. T. 23. P. 411-414.
- Grinevald J.* Presentation d'un manuscrit inédit de Sadi Carnot //Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 383-387.
- Herivel J.* Carnot and French scientific "Milieru" around 1824 //Ibid. P. 81-92.
- Hoyer U.* Uber die Zusammenhand der Carnotischen Theorie mit der Thermodynamik //Arch. Hist. Exact Sci. 1974. V. 13. P. 351-375.
- Kirker M.* Sadi Carnot and steam engine engineers //Isis. 1960. V. 51. P. 257.
- Kühn T.S.* Engineering precedent for the work of S. Carnot //Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 530-535.
- Kühn T.S.* Sadi Carnot and the Cagnard engine //Isis. 1961. V. 52. P. 567.
- La Mer V.C.* Some current misinterpretations of N. L. S. Carnot's memoir and cycle //Amer. J. Phys. 1954. V. 22, № 1. P. 17-29; 1955. V. 23, № 2. P. 117-131.
- McKeon K.M.* S. Carnot and the French engineering community of the 1820's //Actes de la Table ronde "S. Carnot et l'essor de la Thermodynamique". Paris: CNRS, 1976. P. 93-117.

- Mémoires et comptes rendus des Travaux de la société des Ingeniers Civils de France. Paris: 1926.
- Mendoza E.* Sadi Carnot and the Cagnard engine // *Isis*. 1963. V. 54. P. 266.
- Mendoza E.* The writing of the “Reflexions...” and their reception // *Actes de la Table ronde “S. Carnot et l’essor de la Thermodynamique”*. Paris: CNRS, 1976. P. 169–179.
- Payen J.* Une source de la pensée de Sadi Carnot // *Arch. Intem. Hist. Sci.* 1968. № 21. P. 18–32.
- Picard E.* Sadi Carnot, biographie et manuscrit. Paris: Gauthier-Villars, 1927.
- Plank P.* N. L. S. Carnot // *Zeitschr. VDJ.* 1932. Bd. 130. S. 821–822; *Nature*. 1932. V. 130 P. 156–157.
- Raveau C.* Comment Carnot a calculé l’équivalent mecanique de la chaleur: Un document inédit // *C. r. Acad. Sci.* 1919. T. 168. P. 549–552.
- Robelin P.* Nécrologie: Notice sur Sadi Carnot // *Rev. Encycl.* 1832. T. 55. P. 528–530.
- Saint-Robert P.* Sadi Carnot, notice, biographique // *Atti Reale Acad. Sci. Torino*. 1869. V. 4. P. 151–170.
- Schereschewsky P.* Sadi Carnot and the foundation of the science of energy // *Actes de la Table ronde “S. Carnot et l’essor de la Thermodynamique”*. Paris: CNRS, 1976. P. 183–190.
- Taton R.* Sadi Carnot et l’essor de la thermodynamique // *Rev. Hist. Sci.* 1974. P. 170–172.
- Taton R.* La formation de Sadi Carnot: École polytechnique et école de Metz // *Actes de la Table ronde “S. Carnot et l’essor de la Thermodynamique”*. Paris: CNRS, 1976. P. 35–51.

Дополнительная использованная литература

- Араго Ф.* Карно Л.: Биография // *Журн. т-ва нар. просвещения*. 1858. № 3. С. 35–93.
- Араго Ф.* Историческая записка о паровых машинах (пер. Хотинского) СПб.: 1861.
- Араго Ф.* Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т. 1, 2. Ижевск: 2000.
- Афанасьева-Эренфест Т.А.* Необратимость, односторонность и второе начало термодинамики // *Журн. прикл. физики*. 1928. Т. 5, вып. 3/4. С. 3–30.
- Бандура А.В., Бродянский В.М.* Ноосферная экономика // *Энергия*. 1996. № 11.
- Брандт А.А.* Основания термодинамики. Ч. 2. 1918. Приложение 1: Краткий очерк истории термодинамики.
- Бродянский В.М.* Вечный двигатель прежде и теперь. М.: Физматлит, 2001.
- Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.
- Вышнеградский А.И.* Механическая теория теплоты. СПб.: 1874.

- Гельфер Я. М.* История и методология термодинамики и статистической физики. М.: Высшая школа, 1981. 280 с.
- Гухман А. А.* Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат, 1986. 384 с.
- Дальма А.* Эварист Галуа, революционер и математик. М.: Наука, 1984. 112 с.
- Двигатели Стирлинга /Под ред. В. М. Бродянского. М.: Мир, 1975. 440 с.
- Каллендар Г. П.* Предоставление о теплороде в термодинамике //Новые идеи в физике. 1933. № 6. С. 124–158.
- Карно И.* История французской революции. СПб.: 1893.
- Конкурс на проект статуи генерала Карно для города Нолэ //Неделя строителя. 1881. № 35. С. 245.
- Конфедератов И. Я.* История теплоэнергетики. (Начальный период XVII–XVIII вв.). М.: Госэнергоиздат, 1954.
- Конфедератов И. Я.* Джеймс Уатт. М.: Наука, 1969. 222 с.
- Кричевский И. Р.* Понятия и основы термодинамики. М.: Химия, 1970. 439 с.
- Кузнецов Б. Г.* История энергетической техники. М.: ОНТИ, 1937. 146 с.
- Манфред А.* Наполеон Бонапарт. М.: Мысль, 1973. 775 с.
- Мари-Франсуа Сади Карно — новый президент Французской республики //Нива. 1887. № 51. С. 1307–1309.
- Мейерсон Э.* Тожественность и действительность: Опыт теории естествознания как введение в метафизику. СПб.: Шиповник, 1912. 498 с.
- Планк М.* Термодинамика. М.–Л.: Госиздат, 1925. 310 с.
- Планк М.* Принцип сохранения энергии. М.–Л.: ОНТИ, 1938. 236 с.
- Радциг А. А.* История теплотехники. М.–Л.: Гостехтеоретиздат, 1936. 262 с.
- Сироткин В. Г.* Лазар Карно на пути в Россию: (Из истории политической эмиграции “100 дней”), 1815–1818 //Французский ежегодник. 1972. М.: 1974. С. 193–213.
- Сычев В. В.* Дифференциальные уравнения термодинамики. М.: Наука, 1981. 195 с.
- Старосельская-Никитина О.* Очерки по истории науки и техники периода Французской буржуазной революции (1789–1794). М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 274 с.
- Arago F.* Biographies of distinguished scientific men (L. Carnot). L.: 1859.
- Arago F.* Notice historique sur les machines á la vapeur //Rev. Encycl. 1829. T. 28.
- Aries E.* Chaleur et energie. Paris: 1896. 168 p.
- Bandura A., Brodiansky V.* Thermodynamics extends economic potential //Energy. 2001. V. 26. P. 811–814.
- Birembant A.* La deconverte des “Reflexions...” par Clapeyron //Actes de la Table ronde “S. Carnot et l’essor de la Thermodynamique”. Paris: CNRS, 1976. P. 191–193.

- Cardwell D.S.L.* From Watt to Clausius: The rise of thermodynamics in the early industrial age. L.: Heineman, 1971.
- Carnot H.* Mémoires sur Carnot par son fils. Paris: 1861–1864. T. 1–2.
- Carnot L.* Correspondance inédite de Carnot avec Napoleon. Paris: 1819.
- Carnot L.* Don Quihotte: Poëme heroi-comique en six chants. Paris: Brockhaus, 1821.
- Carnot L.* Mémoires historiques et militaires. Paris: 1829.
- Carnot L.* Correspondance générale de Carnot. Paris: 1892–1907. T. 1–4.
- Carnot's historische-militarische Denkwürdigkeiten. Leipzig: 1824.
- Carre H.* Le grand Carnot. Paris: 1947.
- Clausius R.* Die Mechanische Wärmetheorie. Braunschweig: 1876. 353 S.
- Joule J.* Caloric effects of magneto-electricity //Collected papers. 1843. V. 1.
- Serieys A.* Carnot, sa vie politique et privée. Paris: 1816.
- Tredgold T.* Traite pratique sur les chemins en fer. Paris: Bachelier, 1826.
- Tredgold T.* The steam engine. L.: Woodhause, 1838.
- Truesdell C.* Tragicomical history of the thermodynamics, 1822–1854. B.: Springer, 1980. 320 p.
- Truesdell C., Bharatha S.* The concepts and logic of classical thermodynamics as a theory of heat engines. B.: Springer, 1977. 154 p.

Именной указатель

- Александр I* 27–30, 36, 140
Ампер А. 33, 101, 110
Араго Ф. 21, 23, 33–34, 52–54, 88, 101, 104–106, 108, 111, 144
- Бертолле К.* 16, 23, 33, 46, 54, 91, 127
Бонапарт Н. 9, 18–23, 25–29, 31, 34–35, 46, 100, 120
- Вашингтон Д.* 21
Вобан С. 12, 25
- Гей-Люссак* 33, 54–57, 61, 81, 83–84, 101, 107, 131, 145
Гош Л. 16
- Д'Артуа* (см. Карл X)
Дантон Ж. 15
Дюпон С. 14, 110, 116
- Карл X.* 32, 112
Карно Л. 6–7, 9–32, 34–35, 36, 40, 53, 66, 68–69, 99, 107, 110–113, 116–117, 120–121, 123, 137, 140, 168, 172, 173
Карно И. 6–8, 16, 20, 29–31, 39–42, 98, 110, 112–113, 116, 118–125, 150, 155, 172
Клапейрон Э. 5, 76, 84, 114, 122, 124, 136, 140–150, 151, 153–156
Клаузиус Р. 155, 157–161, 163, 165
Константин, вел. кн. 30
Кориолис Г. 69, 104, 168
- Лавуазье А.* 22, 46, 55, 60, 91, 151
Лагранж Ж. 16, 18, 33, 52
Лаплас П. 18–20, 33, 55, 57, 61, 91, 101, 107, 110–111, 145, 151
Луи-Филипп 112, 119, 142
Людовик XVI 15
Людовик XVIII 27–29
- Манфред А.* 21, 29
Майер Р. 7, 56, 87, 104, 124–125, 130, 135, 149–152, 171
Маркс К. 13, 53
Монж Г. 10, 16–18, 46, 91, 107
- Нернст В.* 164
Николай I 142–143
Ньепс К. 23–25, 42, 50, 72, 90
Ньютон И. 172
- Папин Д.* 44, 47, 52
Планк М. 146, 161
Понселе Ж. 36, 69, 168
Прони Г. 33, 64, 99, 101, 107, 110
Пуассон С. 18, 33–34, 38, 57–58, 61, 86, 101, 105–108, 145
- Робелен П.* 117–118
Робеспьер А. 15, 17–18, 29
- Саади* 31, 41–42
Сен-Симон А. 112
Стендаль А. 17
Стирлинг Р. 7, 44, 46, 50–52, 72, 91–96
Суворов А.В. 20
Сэй Ж. 39, 112, 137
- Томсон (Кельвин) У.* 5–6, 42, 65, 75, 122, 130, 133–134, 136, 146, 148, 150, 154–161, 163, 170
- Фультон Г.* 22, 46
- Уатт Дж.* 44–49, 51–52, 54, 67, 70, 91, 102, 107, 147
- Энгельс Ф.* 7, 13, 44, 52–53, 125, 149, 160, 170
- Юшкевич А.П.* 26

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к первому изданию	5
Глава 1. Семья Карно. Революция и империя (1753–1817)	9
Семейные корни	9
Лазар Карно — “организатор победы” революционной Франции	14
Лазар Карно, Наполеон Бонапарт и наука	19
Детство и юность Сади Карно. Политехническая и инженерная школы	31
Глава 2. Жизнь военного инженера (1817–1823)	38
На службе и вне ее	38
Теплоэнергетика первой трети XIX века	42
Глава 3. “Размышления о движущей силе огня...”. Идеи, открытия, заблуждения, предвидения (1824 г.)	63
Постановка задачи. Оценка книги С. Карно основоположниками термодинамики	63
Идеальная тепловая машина	71
Теплофизические расчеты С. Карно и определение им численных значений “движущей силы тепла”	80
Инженерный анализ и прогнозы в книге С. Карно	87
Глава 4. Книга С. Карно и деятели науки Франции. Труды и дни инженера-капитана (1824–1832)	99
Как современники приняли книгу С. Карно	99
Последние годы жизни. Болезнь и смерть	108
Рукописи С. Карно. “Заметки по математике, физике и другим предметам”. Открытие и вычисление механического эквивалента теплоты. Фрагмент работы по экономике	119
Глава 5. Второе рождение мемуара Карно. Завершение разработки основ термодинамики (1832–1878)	140
Мемуар Сади Карно и работа Э. Клапейрона	140
Повторное открытие Первого начала и его утверждение	150
Синтез второго и первого начал в работах У. Томсона и Р. Клаузиуса. “Раздвоение” второго начала	155

Глава 6. Сади Карно и термодинамика XX века	163
Развитие классической термодинамики во второй половине XX века	163
Вклад С. Карно в науку: оценка с позиций начала XXI века	170
Основные даты жизни и деятельности С. Карно	175
Список литература	176
Именной указатель	181

Научное издание

БРОДЯНСКИЙ Виктор Михайлович

САДИ КАРНО — ОСНОВАТЕЛЬ ТЕРМОДИНАМИКИ

Редактор *М.Б. Козинцова*

Оригинал-макет: *А.М. Широков*

Оформление переплета: *А.Ю. АLEXINA*

ЛР № 071930 от 06.07.99. Подписано в печать 09.04.03.
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 12. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997 Москва, Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ».
140010, г. Люберцы, Московская обл., Октябрьский пр-т, 403

ISBN 5-9221-0397-0



9 785922 103978