

К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ ТЕОРЕМЫ КАРНО

Б. И. Спасский, Ц. С. Сарангов

Неоднократно высказывалось мнение о том, что умозаключения по аналогии имеют очень большое значение в развитии науки. Д. Пойа, например, считает даже, что «аналогия, по-видимому, имеет долю во всех открытиях, но в некоторых она имеет львиную долю»¹.

Обычно считается, что умозаключения по аналогии имеют тем большую ценность, чем больше одинаковых признаков у сравниваемых объектов. Следовательно, чем больше общего, сходного между двумя объектами, тем более вероятны выводы по аналогии. Однако в истории науки можно встретить примеры, когда как раз «неправильная» аналогия, т. е. аналогия между принципиально различными явлениями, явлениями разной природы, приводила к открытиям, имеющим первостепенное значение. Таким примером может служить исследование Сади Карно в первой половине XIX века, изложенное им в работе «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». В этой работе Карно, исходя из довольно отдаленной аналогии и основываясь на неправильном понимании работы тепловой машины, получил правильный результат в виде теоремы, носящей его имя.

Сади Карно поставил перед собой задачу исследовать, «ограничена или бесконечна движущая сила тепла, существует ли определенная граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, или, напротив, возможны безграничные улучшения»².

Вопрос, который поставил себе С. Карно был в то время совсем новым, и нужно было найти подход для его решения. Естественно, что мысль Карно обратилась к работам его отца Лазара Карно, посвященным механике. Л. Карно в сочинении «Опыт о машинах вообще»³ (1783 г.) и в более поздней работе «Основные принципы равновесия и движения»⁴ (1803 г.), введя понятие работы, исследовал вопрос о том, каково должно быть устройство машины, чтобы при передаче энергии ее частями потеря этой энергии была бы наименьшей. Он установил, что потеря энергии (мы употребляем современную терминологию) при работе машины происходит либо от трения, либо от удара. Для последнего случая Л. Карно доказал теорему о потере живой силы при неупругом ударе, известную в механике под названием теоремы Карно⁵. Из этой теоремы следовало, что при конструировании машин нужно добиваться такого положения, чтобы передача движения от одной детали машины к другой происходила «плавно» при равенстве скоростей касаемых частей деталей, т. е. чтобы передача движений осуществлялась без скачка в скоростях.

Выводами своего отца, относящимися к анализу работы машин, и воспользовался С. Карно, исследуя работу тепловых машин по аналогии с исследованием работы водяного двигателя.

В водяном двигателе вода, падая с более высокого уровня на более низкий, производит работу. В тепловой машине, рассуждал Карно

по аналогии, теплород «падает» от температуры нагревателя до температуры холодильника, также производя работу. Таким образом, Карно проводил аналогию между массой воды и количеством тепла, с одной стороны, и высотой падения воды и разностью температур — с другой. «Можно с достаточным основанием сравнить движущую силу тепла, — писал Карно, — с силой падающей воды... Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды, движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать, и мы на самом деле и будем называть высотой его падения, т. е. разностью температур тел, между которыми происходит обмен теплорода» (2, стр. 26 и 30).

Чтобы решить вопрос о максимальной работе, которую можно получить от тепловой машины, Карно придумал идеальную тепловую машину, работающую по циклу, носящему его имя.

Здесь опять С. Карно использует аналогию с обычными машинами, хотя и не говорит об этом. Для обычных машин, как установил его отец Л. Карно, нужно стремиться, чтобы передача движения от одного тела к другому осуществлялась при равенстве скоростей тел. Аналогично в тепловой машине передача теплоты (или по взглядам С. Карно — теплорода) должна осуществляться между телами, имеющими одну и ту же температуру.

В обычной машине, чтобы получить от нее максимум полезной работы, нужно по возможности исключить трение. Аналогией этому условию в тепловой машине является, очевидно, условие, чтобы все процессы протекали обратимым путем.

Таким образом С. Карно и пришел к мысли об исследовании «работоспособности» идеальной машины, работающей по обратимому циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат, где рабочим веществом является идеальный газ.

Рассматривая теперь любую другую тепловую машину с другим рабочим веществом, но также работающую по обратимому циклу, Карно мог легко доказать, что ее «движущая сила» должна быть равна «движущей силе» машины Карно, работающей при тех же температурах нагревателя и холодильника. Для этого ему нужно было соединить эти две обратимых машины и заставить одну работать в прямом направлении, а другую в обратном. В результате одного цикла мы получили бы, что рабочее вещество пришло в первоначальное состояние, теплород, взятый у нагревателя и переданный холодильнику, вернулся бы обратно к нагревателю. И если держаться мнения о невозможности вечного двигателя, то нужно принять, что никакой внешней работы не могло быть произведено, т. е. что *«движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми в конечном счете производится перенос теплорода»* (2, стр. 30). А это и есть теорема Карно в его собственной редакции. Если учесть, что под понятием движущая сила тепла нужно понимать коэффициент полезного действия любой машины Карно, и если исключить упоминания о теплороде, то мы имеем здесь современную формулировку так называемой первой теоремы Карно. Так, например: «К. п. д. цикла Карно не зависит от рабочего вещества, а определяется только температурой нагревателя и температурой холодильника» (6, стр. 76) *).

*) Как сказано выше, это положение называют сейчас нередко первой теоремой Карно. Под второй теоремой Карно подразумевают положение о том, что к. п. д. необратимой машины меньше к. п. д. машины Карно, работающей при тех же температурах нагревателя и холодильника. Такой теоремы Карно специально не формулировал, хотя она вытекает из его рассуждений.

В последующее время, устанавливая основы термодинамики, Р. Клаузиус и У. Томсон показали, что, хотя Карно и пользовался неправильными представлениями о природе теплоты, тем не менее его вывод был правильный. Но чтобы получить этот правильный вывод правильным путем, нужно основываться не на принципе невозможности обычного вечного двигателя, а на новом положении, которое было сформулировано Клаузиусом и Томсоном в различных редакциях и которое в последующем стало называться вторым законом, или началом, термодинамики.

Вместе с доказательством теоремы Карно, данным Клаузиусом и Томсоном, стало ясно, что та аналогия, которой пользовался Карно, весьма ограничена и что процесс перехода теплоты от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой принципиально отличается от процесса опускания тела с большей высоты на меньшую. Эта аналогия уже не могла больше играть никакой положительной роли и должна была быть отброшена при исследованиях по термодинамике.

Здесь ситуация была похожа на положение с механическими моделями электромагнитного поля, которые использовал Максвелл при выводе уравнений этого поля. В самом начале они сыграли положительную роль, но затем, когда уравнения были получены, эти аналогии стали уже не нужны и их роль стала даже отрицательной. Также и аналогия между водяным двигателем и тепловой машиной была очень удачно использована Карно. Но затем она стала лишней, ибо уже ничего положительного не могла дать. Наоборот, она могла вводить в заблуждение, направлять усилия на бесплодные поиски. Однако, так же как поиски механического объяснения электромагнитных явлений продолжались еще долгое время после Максвелла, аналогия Карно, правда в несколько модернизированном виде, продолжала жить и служить предметом исследований ряда ученых.

Прежде всего мы должны отметить, что в одном из самых первых руководств по термодинамике, написанном Цейнером⁷ в 1866 г., используется аналогия между падением тела и переходом тепла от нагретого тела к холодному при совершении цикла Карно.

Если тело падает с высоты h_1 до высоты h_2 , то при этом совершается работа

$$W = \frac{U}{h_1} (h_1 - h_2),$$

где U — потенциальная энергия тела на высоте h_1 .

С другой стороны, работа, совершаемая машиной Карно, может быть записана в виде

$$W = \frac{Q}{T_1} (T_1 - T_2),$$

где Q — количество теплоты, взятое у нагревателя при температуре T_1 , а T_2 — температура холодильника.

Эти два выражения имеют одинаковый вид. В связи с этим Цейнер переходит к заключению о существовании аналогии между падением тела и переходом тепла от горячего тела к холодному (по обратимому циклу Карно). При этом весу тела U/h сопоставляется величина Q/T . Поэтому Цейнер предлагает назвать эту величину вместо энтропии тепловым весом.

Подобного рода аналогии продолжали применяться и позже. К этим аналогиям большой интерес проявили энергетики⁸, а также Мах, который еще в 1872 г. в сочинении «Сохранение работы» обобщал эту аналогию. Более подробно и обстоятельно по этому вопросу Мах высказался позже в сочинении «Принципы учения о теплоте»⁹.

Идея Маха в основных чертах сводится к следующему. Для цикла Карно может быть написано соотношение

$$-\frac{Q'}{T_1} + Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = 0,$$

где Q' — количество теплоты, превращенное в работу, Q — количество теплоты, отданное холодильнику, а T_1 и T_2 — температура нагревателя и холодильника. Отсюда следует также

$$-\frac{Q'+Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} = 0,$$

или

$$\frac{Q'}{Q+Q'} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Но подобные выражения могут быть написаны и для других случаев превращения какого-либо вида энергии в работу.

Действительно, для случая падения уровня воды с высоты h_1 до высоты h_2 в количестве P можно написать аналогичное соотношение

$$-\frac{W'}{h_1} + W \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) = 0,$$

где

$$W' = \frac{P}{2} (h_1 - h_2)$$

— произведенная работа, а $W = Ph_2/2$ — потенциальная энергия опустившейся воды. Можно также написать

$$-\frac{W_1}{h_1} + \frac{W_2}{h_2} = 0,$$

где $W_1 = Ph_1/2$ и $W_2 = Ph_2/2$, и, наконец,

$$\frac{W'}{W+W'} = \frac{h_1 - h_2}{h_1}.$$

Точно так же можно рассмотреть процесс совершения работы при переходе электрического заряда от большего потенциала V_1 к меньшему V_2 . Например: рабочим телом является шар, способный расширяться и сжиматься, который забирает количество электричества $q' + q$ от очень большого проводника с потенциалами V_1 , затем совершает работу (расширяясь) и изменяет свой потенциал до значения V_2 , а затем соединяется с другим большим проводником, имеющим потенциал V_2 . Для данного случая мы также можем написать

$$-\frac{W'}{V_1} + W \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) = 0,$$

где W' — энергия, превращенная в работу, W — энергия передаваемая проводнику с меньшим потенциалом.

Обобщая высказанное, Мах подчеркивает, что у каждой формы энергии мы должны различать ее количество (Energienwert) и ее «потенциал», или «уровень» (Niveauwert) и что тогда можно сформулировать общее положение: «Если из общего количества какой-либо формы энергии

$W' + W$, находящейся при потенциале V_1 , часть W' превращается в другую форму энергии, то остаток должен упасть до потенциала V_2 , причем выполняется уравнение $^{10} -\frac{W'}{V} + W \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) = 0$ » (¹⁰, стр. 331—332).

Конечно, Мах понимает различие между процессами совершения работы в результате выравнивания температур и совершения работы в результате выравнивания «потенциалов» (высот, электрических потенциалов и т. д.). Он даже подчеркивает эту разницу, указывая, например, что температурная разница может исчезнуть без совершения работы, а также то, что выравнивание температур не приводит к ее колебаниям, как, например, приходит в колебательное движение вода в сообщающихся сосудах при создании разности ее уровней. Однако он придает очень большой вес высказанной аналогии.

Мнение Маха разделялось многими физиками последней четверти XIX века и прежде всего энергетиками. Планк в своей автобиографии писал: «Другой спор возник в связи с вопросом об аналогии между переходом тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой и опусканием весомого тела с большей высоты до меньшей. Еще раньше я подчеркивал необходимость отчетливого разделения этих двух процессов, потому что они принципиально отличаются друг от друга в такой же степени, как различаются друг от друга первое и второе начала теории теплоты. При этом я натолкнулся на противоречие с воззрениями, имевшими тогда всеобщее распространение, и я не мог добиться у своих коллег признания моей точки зрения. Некоторые физики даже считали ход мыслей Клаузиуса излишне усложненным и к тому же неясным. В частности, они не соглашались с предоставлением теплоте исключительного места среди различных видов энергии, обусловленного введением понятия необратимости. В противовес теории теплоты Клаузиуса они создали так называемую энергетiku, в которой первое начало, так же как и у Клаузиуса, выражало принцип сохранения энергии, но второе начало, которое должно указывать направление всего происходящего, проводило полную аналогию между переходом тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой и опусканием весомого тела с большей высоты до меньшей. Из этого следовало, что предположение о необратимости не является существенным для доказательства второго начала; далее опровергалось существование нуля абсолютной температуры ссылкой на то, что можно измерять только разности температур, так же как разности высот ¹¹.

Чем можно объяснить непонимание данного вопроса со стороны ряда крупных ученых, в частности таких, как Мах, Оствальд и другие. Не касаясь всего вопроса в целом, отметим здесь два обстоятельства. Во-первых, для Маха и энергетиков был характерным формальный подход к физическим понятиям и физическим законам вообще. А во-вторых, мы хотели бы особенно подчеркнуть, что для Маха и других позитивистов характерной была переоценка значения роли аналогии в физических теориях. Действительно, для Маха основным методологическим принципом науки был принцип «экономии мышления». Но никого не надо убеждать в том, что аналогия в науке способствует «экономии мышления». В связи с этим известно, что Мах придавал большое значение аналогии в процессе познания. «Случай сходства имеет еще... — писал Мах, — значение в смысле экономии мышления, распространяя известный взгляд на большую, чем раньше, область» ¹². А так как, согласно Маху, наука не отражает какой бы то ни было объективной реальности, то, устанавливая аналогию между разными явлениями, мы движемся вперед в науке. Вот и установление аналогии между работой тепловой машины и любой

другой является в связи с этим движением вперед в науке. Соответствует ли эта аналогия действительности или нет — такой вопрос для Маха и других позитивистов не мог возникнуть.

Развитие науки отвергло точку зрения Маха, Оствальда и других энергетиков и позитивистов. Аналогия Карно, аналогия между совершением работы тепловой и совершением работы любым видом энергии больше не играет никакой роли в физической науке. И если мы вспоминаем историю с открытием Карно *), то это только для того, чтобы подчеркнуть, что самая несовершенная аналогия способна сыграть большую эвристическую роль, но что в дальнейшем всякая аналогия раньше или позже становится ненужной и даже способна тормозить последующее развитие науки.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. П о й а, Математика и правдоподобные рассуждения, М., ИЛ, 1957, стр. 36.
2. С. К а р н о, Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу, в сб. «Второе начало термодинамики», М.—Л., ОНТИ, 1934, стр. 19.
3. L. C a r n o t, Essai sur les machines en général, Paris, 1783.
4. L. C a r n o t, Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement, Paris, 1803.
5. См., например: Н. Е. Ж у к о в с к и й, Теоретическая механика, 2-е изд., М.—Л., Гостехиздат, 1952.
6. И. П. Б а з а р о в, Термодинамика, М., Физматгиз, 1961, стр. 76.
7. G. Z e u n e r, Grundlage der mechanischen Wärmetheorie, Leipzig, 1866.
8. См.: J. P o r r e r, Electricische Kraftübertragung, Wien, 1884; G. H e l m, Die Lehre von der Energie, Leipzig, 1887; R. W r o n s k y, Das Intensitätsgesetz, Frankfurt, 1888; W. M e y e r h o f f e r, Der Energieinhalt, Zs. Phys., 544 (1891).
9. E. M a c h, Die Principien der Wärmelehre, Wien, 1896; 2. Auflage, Leipzig, 1900.
10. E. M a c h, Die Principien der Wärmelehre, Leipzig, 1900, стр. 331.
11. «Макс Планк». Сб. к столетию со дня рождения Макса Планка. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 19—20.
12. Э. М а х, Познание и заблуждение, М., 1909, стр. 232.
13. Р. Ф е й н м а н, Фейнмановские лекции по физике, вып. 4, гл. 44, М., «Мир», 1965.

*) Интересно отметить, что в наше время аналогию Карно вспомнил Фейнман и использовал ее в своих известных лекциях по физике ¹³.