

Закон Джоуля—Ленца: лица, идеи, эксперименты

кандидат физико-математических наук Б.В.Булюбаш

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева (Нижегород, Россия)

e-mail: borisbulubash@gmail.com

Рассмотрена история открытия закона теплового действия тока. Дано сравнение вклада двух авторов закона — английского физика Дж.Джоуля и русского физика Э.Х.Ленца. Показано, что установлению закона предшествовал — причем у обоих — период увлечения конструированием электродвигателей. Подчеркнуто, что для Джоуля открытие закона теплового действия тока стало началом экспериментов по определению механического эквивалента теплоты. Большое значение для понимания закона теплового действия тока имели его эксперименты с токами индукционного происхождения. Отмечено активное участие Джоуля в работе научных обществ.

Ключевые слова: Джоуль, Ленц, джоулево тепло, механический эквивалент теплоты, закон сохранения энергии, история электродвигателя.

Как правило, законам, уравнениям и другим закономерностям физики присваиваются имена открывших их ученых: законы Ньютона, закон Ома, уравнение Эйнштейна. В ряде случаев могут фигурировать два имени: закон Бойля—Мариотта, условие Брэгга—Вульфа, вектор Умова—Пойнтинга. Второе имя может появиться по разным причинам. Чаще всего второй автор — это тот, кто установил закон независимо от первого. Бывает и по-другому. Так, русский физик Н.А.Умов и английский физик Дж.Пойнтинг, в честь которых назван вектор плотности потока энергии, вкладывали в это понятие разный смысл: Умов ввел его для упругих волн, а Пойнтинг — для электромагнитных. В англоязычном мире этот вектор, как правило, называют вектором Пойнтинга, поскольку Умов практически неизвестен за пределами нашей страны.

Тепловое действие тока

Данная статья посвящена истории одного из законов с двойным авторством — закона теплового действия тока, он же закон Джоуля—Ленца. Этот закон определяет количество теплоты Q , выделяющейся за время t в проводнике с сопротивлением R при протекании по проводнику тока I : $Q = I^2Rt$.

Сам факт выделения тепла в проводнике с электрическим током к началу 1840-х годов был хорошо известен. Первую связанную с этим явлением закономерность зафиксировал в 1821 г. английский химик Х.Дэви. Он экспериментировал с про-

водниками из различных металлов, разной длины и с разной площадью поперечного сечения. При неизменной силе тока количество выделившегося тепла было разным — нетрудно догадаться, что оно изменялось обратно пропорционально удельной проводимости металла, т.е. достигало максимума в случае свинца и минимума в случае серебра. Дэви также зафиксировал пропорциональность сопротивления проводника его длине и обратную пропорциональность площади поперечного сечения.

Собственно же закон теплового действия тока установил в серии экспериментов молодой манчестерский физик Дж.П.Джоуль. 17 декабря 1840 г. он представил свою статью «О производстве теплоты voltaическим электричеством» в Лондонское королевское общество. Интересы у экспертов общества статья не вызвала. В качестве компромисса в декабрьском номере 1840 г. журнала, издававшегося Лондонским королевским обществом, был опубликован дайджест статьи [1]; целиком же эта работа уже с измененным названием («О тепле, развиваемом металлическими проводниками электричества и ячейками батареи в процессе электролиза») вышла в свет в журнале «Philosophical Magazine» в 1841 г. [2].

Спустя два года журнал «Annalen der Physik und Chemie» в двух номерах опубликовал статью академика Петербургской академии наук Э.Х.Ленца «О законе выделения тепла в гальваническом токе» [3–5]. Явление выделения тепла в гальваническом токе заинтересовало ученого в связи с опыта-

ми швейцарского физика А.О.де ля Рива; они показали, что количество теплоты и силу тока связывает линейная, а не квадратичная (как у Джоуля) зависимость. Общий объем статьи Ленца составил 70 страниц (а в статье Джоуля их было 18), в ней подробно описаны эксперименты, измерительные приборы и использованные математические модели. Выступая с соответствующим докладом на заседании Академии наук в Санкт-Петербурге 2 декабря 1842 г., Ленц, в частности, сказал: *Исследования, которые я собираюсь доложить Академии, занимают меня уже в течение нескольких лет; они были начаты задолго до появления сообщения Джоуля** (в «*Philosophical Magazine*») в октябре 1841 г., и я полагаю, что их следует продолжить, несмотря на то, что мои результаты в основном совпадают с результатами Джоуля, так как опыты последнего могут встретить некоторые обоснованные возражения [5, с.361].

Джоуль и Ленц

Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) — английский физик-экспериментатор, член Лондонского королевского общества. В своей лаборатории в Манчестере (в XIX в. это была единственная частная физическая лаборатория на территории Великобритании) он на протяжении нескольких десятилетий, используя разные установки, измерял механический эквивалент теплоты. Такое название получил коэффициент пересчета между единицами измерения количества теплоты и механической работы. Измерения Джоуля стали экспериментальной основой закона сохранения энергии, а его самого история науки называет одним из создателей этого закона. Джоуль не занимал никаких официальных должностей, основную часть жизни трудился на принадлежащем отцу пивоваренном заводе, а физикой занимался в свободное от работы время. Четыре раза Джоуля избирали президентом Манчестерского литературно-философского общества.

Эмилий Христианович (Генрих Фредерик Эмиль) Ленц (1804–1865) — русский физик, член Императорской Санкт-Петербургской академии наук, заведующий физическим кабинетом академии. В 1833 г. установил правило (закон) Ленца, позволяющее определить направление индукционного тока. Известен также своими исследованиями по физической географии и как автор популярного учебника физики для гимназий. В 1841–1863 гг. — декан физико-математического факультета Импе-

раторского Санкт-Петербургского университета, в 1863–1864 гг. — ректор университета.

По широте научных интересов, интегрированности в государственные институты и социальной активности академик Ленц — полная противоположность Джоулю, у которого к тому же не было высшего образования, что, впрочем, не мешало его избранию в Лондонское королевское общество.

Первоначально Джоуля интересовали электродвигатели — несомненные символы технического прогресса. Общественный интерес к таким двигателям резко вырос после публикации в 1835 г. статьи российского физика из г.Дерпта, действительного члена Кёнигсбергского физико-экономического общества (а в недалеком будущем ординарного академика Императорской Санкт-Петербургской академии наук) Б.С.Якоби**. В статье Якоби подробно описал устройство сконструированного им электродвигателя. Первоначально опубликованная по-французски, статья была быстро переведена на основные европейские языки.

** Борис Семенович (Мориц Герман фон) Якоби (1801–1874) — немецкий и русский физик, академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук.



Дж.Джоуль. Фотогравюра 1913 г. по картине Г.Паттена 1863 г. [22, №1549.1].

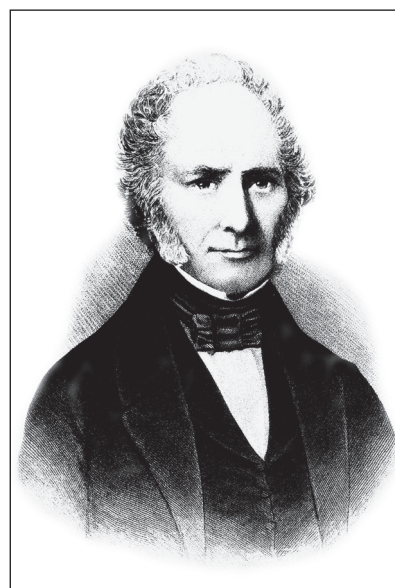
* Так Ленц называл Джоуля.



Э.Х.Ленц (портрет из Библиотеки имени Б.Дибнера по истории науки и техники в Библиотеке Хунтингтона в г.Сан-Марино, Калифорния).



Б.С.Якоби, литография Э.Хау. 1837 г. (портреты профессоров Императорского университета в Дерпте, Библиотека Тартуского университета, №ÜR868).



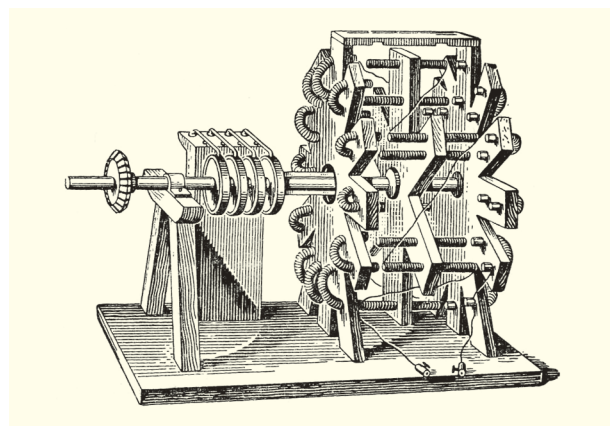
У.Стёрджен, издатель журнала «Annals of electricity and Gurdian of Chemisrty and Expermental Sciences». Гравюра по портрету маслом, ныне утерянному [7, р.26].

Что представлял собой построенный Якоби электродвигатель? Он состоял из вращающейся (ротор) и неподвижной (статор) частей. На роторе и на статоре были закреплены электромагниты, силы взаимодействия электромагнитов ротора с электромагнитами статора обеспечивали вращение ротора. Направление тока в каждом из электромагнитов ротора регулярно изменялось так, чтобы в любой момент времени на него действовала сила притяжения со стороны электромагнита статора, ближайшего к нему по ходу вращения. За время полного оборота вала электродвигателя полярность электромагнитов изменялась восемь раз. Соответственно, скорость вращения ротора постоянно увеличивалась. Биограф Дж.П.Джоуля Д.Кардвелл писал: *...инженеры хорошо представляли себе энергию, которую можно было получить от пара, от ветра или от угля... но что за сила была спрятана в вольтовом столбе — источнике энергии для электродвигателя* [7, р.24]. По мере работы парового двигателя количество угля визуально уменьшалось, с гальваническим же элементом никаких видимых изменений не происходило.

Одним из главных достоинств электродвигателя конструкции Якоби был *совершенно новый принцип использования электромагнетизма для непосредственного получения постоянного кругового движения вместо бесперспективных попыток получения в электромагнитных машинах поступательно-возвратного движения* [8, с.80]. В Санкт-Петербурге

была создана правительственная Комиссия по приложению электромагнетизма к движению судов по способу профессора Якоби, в 1837 г. в ее состав был включен Ленц.

Связанные с появлением электродвигателя ожидания были сродни своего рода электрической эйфории, а потому вполне естественным стало появление журнала, почти полностью посвященного электричеству. Издателем журнала «Анналы электричества» («Annals of electricity and Gurdian of Chemisrty and Expermental Sciences»), первый выпуск которого вышел в 1836 г., был изобретатель электромагнита и популяризатор науки У.Стёрджен. В журнале публиковались в том числе пере-



Электродвигатель конструкции Б.С.Якоби. [9, S.294].

воды наиболее резонансных статей; в частности, в 1836 г. был напечатан английский перевод статьи Якоби про электродвигатель.

8 января 1838 г. «Анналы электричества» опубликовали первую статью Джоуля — письмо в редакцию с описанием электродвигателя собственной конструкции. Представляя 19-летнего автора, Стёрджен лаконично заметил: *мистер Джоуль намеревается использовать устройство для движения локомотивов и лодок* [7, р.30].

Нужен ли электродвигателю источник энергии?

Энтузиазм Джоуля в отношении будущего электрических устройств стал причиной возникновения гипотезы, противоречащей с современной точки зрения здравому смыслу. Эта гипотеза возникла у ученого при анализе работы гальванического элемента.

Вот что написал Р.М.Фокс, автор биографической статьи об ученом: *Джоуль не осознавал, что двигатель может совершать работу только за счет каких-то других источников энергии, в данном случае за счет химической энергии батареи, которая была намного менее очевидным источником энергии, чем топливо в паровой машине. Джоуль был еще так далек от принципа сохранения энергии или даже понимания процессов ее превращения, что он мог допустить возможность производства неограниченной работы двигателя без поставки топлива в каком-либо виде* [10, р.82].

Ленц такой возможности не допускал, при этом, сравнивая процесс горения и химические реакции в элементе, он отдавал безусловное преимущество батарейке: горение порождает дым и золу, их обратное превращение в дерево и уголь невозможно; что же касается гальванического элемента, то металл, который там растворяется, может быть снова выделен без особых затрат. Комментируя предпочтения Ленца, его биографы замечают, что, *хотя Ленц и не заблуждался относительно возможности получения даровой энергии с помощью электромагнетизма* [8, с.68], он был еще очень далек от понимания процессов преобразования энергии.

В конце первой половины 19 столетия у представителей научного сообщества были разные взгляды на сохранение и превращение энергии. В связи с этим интересную информацию находим в «Истории физики» Ф.Розенбергера (впервые изданной в конце XIX в.), в которой написано: *...то, что perpetuum mobile все-таки не считалось абсолютно невозможным, ясно видно из следующих слов уважаемого физика Мунке, которые можно найти в «Физической энциклопедии» Гелера (1833). Если*

речь пойдет о perpetuum mobile physicae (физическом вечном двигателе) то не подлежит никакому сомнению, что таковой возможен, ибо круговорот вещей в природе длится непрерывно и непрерывно возобновляется [11, с.58]. В качестве таковых Г.В.Мунке* упоминает вращение Земли вокруг своей оси и планет вокруг Солнца. Он упоминает также ежедневные колебания стрелки компаса, непрерывно текущую реку (что обеспечивается непрерывной сменной испарения и конденсации), непрерывные колебания барометра. Многочисленные конструкции якобы работающих вечных двигателей Мунке относит к совсем другой категории perpetuum mobile mechanicae.

Судя по всему, категорического запрета вечного движения в сознании большинства физиков первой половины XIX в. не существовало. Это лишнее раз говорит об убедительности аргументов Джоуля, сумевшего измерениями механического эквивалента теплоты изменить мировоззрение своих коллег. При первом измерении такого эквивалента использовался электрический ток. Открытие закона теплового действия тока в 1840 г. стало, таким образом, предысторией главного сюжета научной биографии Джоуля — определения механического эквивалента теплоты.

Авторитет экспериментатора: Джоуль против Ленца

Авторитет Джоуля как физика-экспериментатора первоначально не был высоким. Советский историк физики Т.П.Кравец писал: *Ниже автор [т.е. Э.Х.Ленц. — Б.Б.] упоминает в самом начале своей статьи о работе Джуля** на ту же тему. Не будем отнимать от нее ее достоинств; посредством ее сам автор, безусловно, мог убедиться в существовании той же законности. Но той фундаментальности, строгости и полной убедительности, которая отличает работу Ленца, в ней, конечно, усмотреть нельзя. Напомним, что и в другой самой знаменитой своей работе — в работе по первому определению механического эквивалента тепла — Джуль также удовольствовался весьма приближенным значением этой величины, взяв среднее из очень сильно различавшихся данных отдельных опытов. Но в том случае он впоследствии сам исправил дело рядом замечательных по точности исследований. Здесь же работа Джуля стала убедительной только после работы нашего соотечественника* [12, с.472].

* Георг Вильгельм Мунке — профессор физики Гейдельбергского университета.

** Кравец, вслед за Ленцем, так называл Джоуля.

Недостаточную статистическую обработку Джоулем измерений отмечают авторы биографии Ленца. О.А.Лежнева и Б.Н.Ржонсницкий пишут: *Джоуль обосновал зависимость от сопротивления четырьмя измерениями и ошибкой примерно 3%, а зависимость от величины тока установил на основании пяти измерений в интервале температур от 0 до 22°С. Они также отметили, что количество выделяющейся теплоты определялось по изменению температуры жидкости, в качестве которой Джоуль использовал воду, а Ленц 85%-ный спирт, поскольку электропроводность спирта существенно меньше электропроводности воды (что снижало риск утечки)* [8, с.108].

Еще одна погрешность была связана со шкалой тангенс-гальванометра. При измерении тока Джоуль использовал шкалу гальванометра до угла в 60°. Ленц же показал, что пропорциональность тока тангенсу угла отклонения не выполняется для углов, больших 40°.

Учтя все эти факты, Кравец сделал вывод: *...работа Джоуля стала убедительной только после работы нашего соотечественника* [12, с.472]. На самом деле признание научным сообществом работ Джоуля (и той, которую имеет в виду Кравец, и следующей, с использованием индукционных токов вместо гальванических) не было одномоментным и тем более не было следствием работы Ленца.

Эксперименты, в которых Джоулем был установлен, а Ленцем проверен (и подтвержден) закон теплового действия тока, занимают в биографиях этих ученых разное место. Ленц не стал продолжать работы в данном направлении, его следующая статья была посвящена исследованию электродвижущей силы поляризации в электролитах. К тому же в 1843 г. он был избран деканом, поэтому возможность проводить самостоятельные исследования существенно снизилась.

Для Джоуля, напротив, открытие закона теплового действия тока стало началом экспериментов по изучению производства теплоты в электрических, химических, механических и жидкостных системах. Именно в тех экспериментах был поставлен вопрос об определении механического эквивалента теплоты и получены первые данные о его численном значении. В конечном счете выполненные в собственной лаборатории Джоуля измерения такого эквивалента были признаны классическими; мы с полным на то основанием можем, используя фразеологию Кравца, говорить об их полной убедительности и фундаментальности.

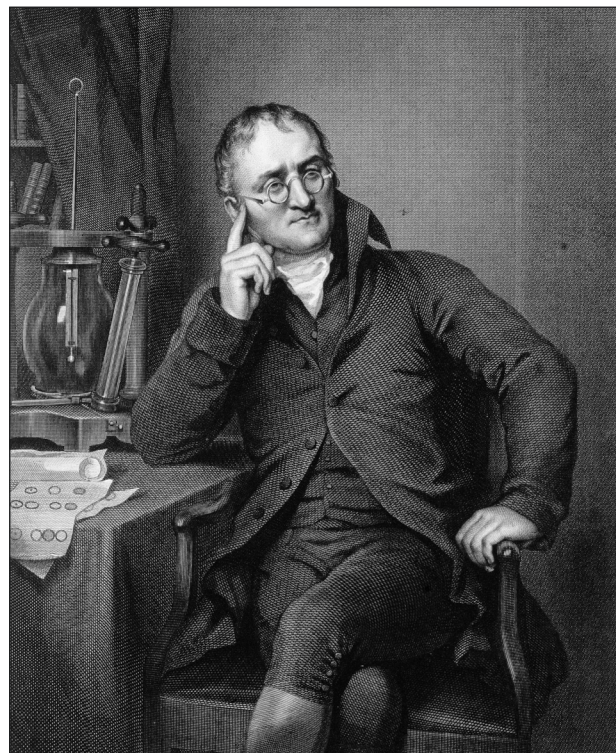
Открытый им и пока еще безымянный закон теплового действия тока Джоуль позиционировал как свой вклад в фундаментальную науку, объясняя с его помощью процесс горения. Он напоми-

нает, что, согласно представлениям шведского химика Й.Я.Берцелиуса, за свет и тепло, сопровождающие процесс горения, отвечает электрический разряд между частицами сгорающего вещества и частицами кислорода. Джоуль предполагает, что выделение тепла в подобных разрядах как раз и описывает открытый им закон теплового действия тока: *Я придерживаюсь мнения, что теплота, выделяющаяся в этом и в некоторых других химических процессах, обусловлена электрическим сопротивлением* [13, р.50].

Джоуль и общество «Lit & Phil»

Про открытый им закон теплового действия тока и про свое предложение дополнить теорию Берцелиуса Джоуль рассказал в ноябре 1841 г. на заседании Манчестерского литературного и философского общества (The Manchester Literary and Philosophical Society, сокращенно «Lit & Phil»). Участники заседания проявили явный интерес к сообщению. Впервые за четыре года Джоуль увидел интерес научного сообщества к своим исследованиям.

Доклад Джоуля произвел впечатление и на президента общества, знаменитого химика Дж.Дальтона, который впервые публично от имени общества поблагодарил докладчика за содержательное



Президент общества «Lit & Phil» Дж.Дальтон, 1823 г. (портрет из коллекции Музея науки в Лондоне).

выступление. В январе следующего, 1842 г. Джоуль был избран членом общества и уже в этом качестве участвовал в заседании еще одной общественной организации — британской Ассоциации содействия развитию науки.

Манчестерское литературное общество было вторым по старшинству (после Лондонского королевского общества) действующим научным обществом Англии. Членство в нем позволяло признать человека ученым в эпоху, когда наука еще не была общепризнанной и уважаемой профессией. Как и другие научные общества, «Lit & Phil» предоставляло своим членам возможность пользоваться обширной и регулярно пополняемой библиотекой. Исключительно важной была также возможность публиковаться в трудах общества. Так, «The Manchester Memoirs» опубликовали 26 из 117 докладов, прочитанных Дальтоном на заседаниях «Lit & Phil». С обществом Джоуль связал всю последующую жизнь. С 1844 г. он занимал должность библиотекаря общества, с 1846-го — секретаря. Четыре раза Джоуля избирали президентом «Lit & Phil».

Несколько слов необходимо сказать еще об одном научном обществе — об упоминавшейся выше Ассоциации содействия развитию науки. Ежегодные собрания ассоциации проходили в разных британских городах и оказывали существенное влияние на развитие науки за пределами Лондона. Участие в них приобщало молодых ученых из провинции к большой науке. Ассоциация не ограничивалась чисто организационными мероприятиями, развернув большую программу грантовой поддержки нестоличной науки. В июне 1842 г. в Манчестере проходило очередное ежегодное собрание, и на нем (как ранее на заседании общества «Lit & Phil») Джоуль представил свою гипотезу, что выделение тепла в процессе горения по своей природе не отличается от выделения тепла током и описывается теми же законами. Статья с изложением этой гипотезы («Об электрической природе теплоты сгорания») была опубликована в 1841 г. [14]. Идею Джоуля было невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть. Могу предположить, что такая гипотеза была нужна Джоулю, чтобы привлечь внимание научного сообщества к своим исследованиям. По крайней мере однажды — на заседании «Lit & Phil» — ему это удалось.

Где рождается теплота

Еще одна гипотеза Джоуля относилась к тому, что происходит «внутри» электрической цепи с гальваническим элементом. Джоуль предположил, что в химических реакциях, отвечающих за разделе-

ние зарядов в батарее, в том числе высвобождается скрытая теплота и что электрический ток переносит эту теплоту в остальные участки контура. Гипотеза укладывалась в рамки субстанциальной теории теплоты, согласно которой теплота — не состояние движения частиц вещества, а невесомая субстанция (теплород). Стронниками концепции теплорода было абсолютное большинство современников Джоуля.

Из обнаруженной Джоулем зависимости $Q = I^2Rt$ с помощью несложных рассуждений можно прийти к весьма важным выводам. Действительно, пусть R — полное сопротивление замкнутой цепи, состоящей из гальванического элемента и нагрузки R . Тогда количество теплоты Q , выделившееся в цепи за время t , будет, соответственно, $Q \sim I \times IRt$. По закону Ома для замкнутой цепи $IR = E$, где E — электродвижущая сила элемента. Тогда $Q \sim It$, т.е. количество теплоты пропорционально прошедшему в цепи электрическому заряду (It), а следовательно, и массе израсходованного цинка. Джоуль сделал важный вывод: количество произведенной в контуре теплоты пропорционально массе израсходованного цинка.

Еще в 1840 г., изучая электродвигатель и источник питания, Джоуль заметил, что совершенной электродвигателем механической работе всегда соответствовала определенная масса израсходованного в гальваническом элементе цинка. Большей работе соответствовала большая степень уменьшения массы цинка. Исследователь показал, что механическую работу и массу израсходованного цинка связывает прямая пропорциональная зависимость.

К заседанию «Lit & Phil», состоявшемуся в январе 1843 г., в распоряжении Джоуля были данные экспериментов, в которых были измерены: во-первых, количество теплоты (Q), выделяющееся в проводнике с током, во-вторых, совершенная электродвигателем работа (A) и, в-третьих, масса цинка (M), израсходованного за соответствующее время в гальваническом элементе. Выяснилось, что Q и A прямо пропорциональны M . Основываясь на этом, Джоуль сделал несколько заявлений, свидетельствующих, что он близок к признанию пропорциональности теплоты и работы. Он разработал эксперимент с использованием индукционного тока, в котором механическая работа будет полностью превращаться в теплоту. В таком случае станет возможным определить численное значение механического эквивалента теплоты.

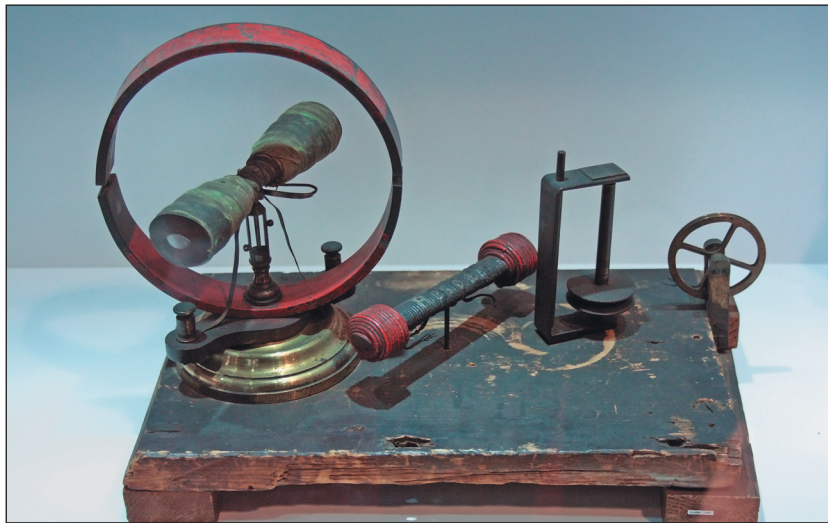
О подробностях такого эксперимента — и первого в истории определения уже упоминавшегося выше механического эквивалента теплоты — Джоуль рассказал 15 августа 1843 г. на собрании Ассо-

циации содействия развитию науки в ирландском городе Корке. По просьбе организаторов, сославшихся на переполненность программы физической секции, Джоуль выступал на заседании химической секции. Отчасти ситуация объясняется просто отсутствием на тот момент времени привычных нам границ между физикой и химией. Так, науку о теплоте рассматривали как важнейший раздел химии. Что касается электричества и магнетизма, то они не имели одной привязки к какой-то одной дисциплине, а механика, оптика и планетарная астрономия относились к натуральной философии.

Перенос доклада Джоуля в химическую секцию свидетельствовал также и о том, что научное сообщество тематику его исследований не считало актуальной для физики. Содержание доклада представлено в статье «О тепловых эффектах магнитоэлектричества и механической ценности теплоты», в том же 1843 г. опубликованной в «Philosophical Magazine» [13]. В названии статьи впервые появляется словосочетание *mechanical value of heat*, в дальнейшем замененное более точным *mechanical equivalent of heat*.

Гипотеза об электрическом токе как о переносчике теплоты прожила недолго, новый эксперимент Джоуля заставил от нее отказаться. В том эксперименте ученый также проверял, выполняется ли открытый им закон, если ток имеет индукционное происхождение.

Эксперимент выглядел следующим образом. Джоуль вставил в стеклянный сосуд катушку с железным сердечником, наполнил сосуд водой и поместил его между полюсами подключенного к гальваническому элементу электромагнита. Концы проводов катушки с сердечником замкнуты (используются скользящие контакты) через чувствительный гальванометр. Катушку приводят во вращение с частотой 600 оборотов в минуту. При этом четверть часа контур катушки разомкнут и четверть часа — замкнут. Разность между количествами теплоты в обоих случаях должна, соответственно, определяться только индукционным током. Измерения показали, что такая разность пропорциональна квадрату силы тока в катушке и ее сопротивлению. Это означало, что закон теплового действия тока — установленный в отношении тока



Электромотор, созданный Дж.П.Джоулем в 1838–1841 гг. (экспонат Музея У.Хантера в Глазго, GLAHM №113365).

от гальванического элемента — выполняется также и в случае тока индукционного происхождения. Таким образом, теплота производится непосредственно током и никакого переноса теплоты электрическим током не происходит.

Интересно, что до этого эксперимента Джоуль не высказывал сколько-нибудь выраженного несогласия с концепцией теплорода. Как мы видели, его первоначальная интерпретация закона теплового действия тока вполне с этой концепцией сосуществовала. Эксперимент доказал, что тепло генерируется также и магнитоэлектрическим током. Это означает, что закон, установленный для тока от гальванического элемента, выполняется и для тока индукционного и что производство теплоты связано именно с током.

Механическая «ценность» теплоты

Затем Джоуль усложнил эксперимент: включил в контур вращающейся катушки дополнительный источник тока — гальванический элемент. Новые измерения показали, что определенному значению тока в интересующей нас части контура соответствует одно и то же количество тепла, выделяющегося в этой части контура в единицу времени. Количество теплоты остается неизменным в трех разных случаях: когда в контуре действует только гальванический элемент, когда ток имеет чисто индукционное происхождение и когда источников тока два — гальванический элемент и электродвижущая сила индукции.

Именно в эксперименте с индукционными токами Джоуль впервые вычислил механический эк-

вивалент теплоты. Для этого он определил затраченную на вращение катушки работу и измерил количество выделившегося тепла. Предположив, что механическая работа численно равна количеству выделившейся теплоты, Джоуль рассчитал среднее значение (по 13 измерениям) механического эквивалента теплоты, который получился равным (в современных единицах) 4.15 Дж/кал (современное значение — 4.184 Дж/кал).

В статье 1843 г. Джоуль впервые высказался в отношении природы теплоты: *Если мы рассматриваем теплоту не как субстанцию, но как состояние вибраций, то, кажется, нет причины, почему бы ей не возникать в результате простого механического воздействия* [15, p.273].

На этом заканчивается история закона Джоуля—Ленца и начинается другая — история измерений механического эквивалента теплоты, ставшая для Джоуля историей успеха. И закон Джоуля—Ленца, и механический эквивалент теплоты стали сильными аргументами в истории признания идеи сохранения энергии. Выявляя закономерности теплового действия тока, Джоуль обрел навыки физика-экспериментатора высочайшей квалификации.

Как именно Джоуль использовал приобретенный опыт в новых экспериментах? После 1843 г. он разработал новые схемы определения механического эквивалента теплоты. Используя термометры, специально для него созданные мастером Дж.Б.Дансером, Джоуль довел точность измерений температуры до 0.005°F (что вновь вызвало недоверие у некоторых коллег). В 1847 г. в Окс-

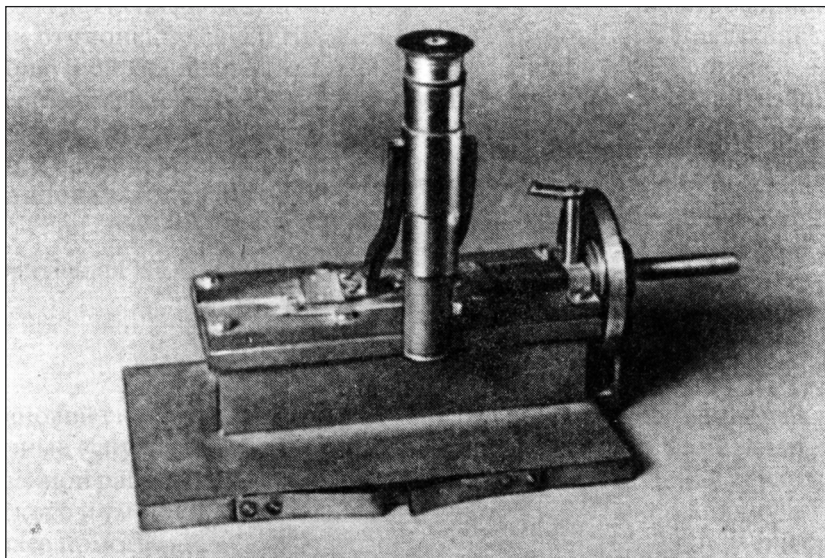
форде в числе слушателей его доклада оказался 23-летний профессор Университета Глазго У.Томсон (будущий барон Кельвин), на которого рассказанное Джоулем произвело впечатление. Именно после выступления Томсона в прениях по докладу научное сообщество начало меняться в своем отношении к «манчестерскому пивовару».

В своем следующем эксперименте, описанном в дополнении к статье 1843 г., Джоуль впервые измерил механический эквивалент теплоты без использования электричества в каком-либо виде. Он продавливал воду в сосуде через перфорированный маленькими отверстиями поршень. Определив работу, затраченную на продавливание, и измерив количество выделившейся теплоты, Джоуль рассчитал эквивалент теплоты, который оказался равным 4.140 Дж/кал. Два значения эквивалента, полученные в принципиально разных по дизайну экспериментах, не сильно отличались друг от друга, что воодушевило ученого.

В том же дополнении Джоуль сделал часто цитируемое заявление о соответствии концепции механического эквивалента теплоты замыслу Создателя: он убежден, *что могучие силы природы, созданные велением Творца, неразрушимы и что во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точное эквивалентное количество теплоты* [10, p.89].

Академик Ленц, без сомнения, следил за публикациями Джоуля и был в курсе выполненных им измерений механического эквивалента теплоты. К сожалению, отношение Ленца к деятельности Джоуля нам неизвестно. В то же время по поводу эквивалента теплоты высказался Якоби — ближайший коллега Ленца.

В 1852 г. Якоби, имея в виду понятие механического эквивалента теплоты, написал: *это равенство или эта пропорциональность между произведенной током теплотой и работой не дает нам, однако, право говорить, вслед за Джоулем, о трансформации тепла в механическую работу* [17, p.2033]. Якоби считал — его точка зрения пользовалась известной популярностью, — что мы имеем право говорить только о пропорциональности между теплотой и работой. Однако в таком случае понятие механического эквивалента теплоты теряет смысл.



Скользкий микроскоп Дж.Дансера, созданный для калибровки и градуировки термометра Джоуля [16, с.33].

Судьбы творцов закона

В неявной форме судьбы Ленца и Джоуля сравнили биографы Ленца. Стремясь вписать постфактум научную биографию своего героя в историю закона сохранения энергии, они написали: *Ленц все время имел дело с явлениями взаимного превращения механической, тепловой, электромагнитной и химической форм энергии* [8, с.10]. Так, Ленц установил, что производимое в электрической цепи количество теплоты пропорционально площади поверхности цинка в гальваническом элементе. В этом экспериментальном факте, по мнению биографов Ленца, *заключается закон сохранения энергии при превращении посредством электричества химической энергии в тепловую*. Интересно, что это свое высказывание Лежнева и Ржонсницкий сопроводили репликой: *Джоуль в то же самое время ограничивался изучением механического эквивалента теплоты* [подчеркнуто мной. — Б.Б.] [8, с.11]. Биографы Ленца недвусмысленно противопоставили масштаб исследований своего героя кажущейся простоте экспериментов Джоуля.

Своеобразным ответом на такое противопоставление можно считать исследование американского историка науки Н.Кипниса. Он проанализировал около 200 книг и статей, посвященных кругу вопросов, который впоследствии стали называть термодинамикой, и вышедших в свет в 1840–1870 гг. Для удобства анализа временной промежуток был разделен на три десятилетия (1840–1850, 1850–1860 и 1860–1870). Для каждого из них был составлен рейтинг физиков по количеству упоминаний их имен в просмотренных публикациях. Абсолютное первое место в рейтинге занял Джоуль. В первом десятилетии он упомянут 14 раз, во втором — 42, в третьем — 18. Второе и третье места в первом десятилетии заняли Н.-Л.С.Карно и Ю.Р.фон Майер, во втором — Р.Ю.Э.Клаузиус и Н.-Л.С.Карно, в третьем — У.Томсон и Р.Ю.Э.Клаузиус соответственно. Из физических понятий чаще всего упоминался механический эквивалент теплоты, тогда как термин «энергия» встречался очень редко [17, с.2012]. Именно деятельность Джоуля, настойчиво измерявшего механический эквивалент теплоты, вызвала наибольший интерес научного сообщества.

Попытаюсь ответить на вопрос: что сделало Джоуля знаменитым физиком? Что помогло ему преодолеть недружелюбные к нему жизненные обстоятельства: отсутствие университетского образования, необходимость работать и сохранять устойчивость в отсутствие обратной связи от коллег?

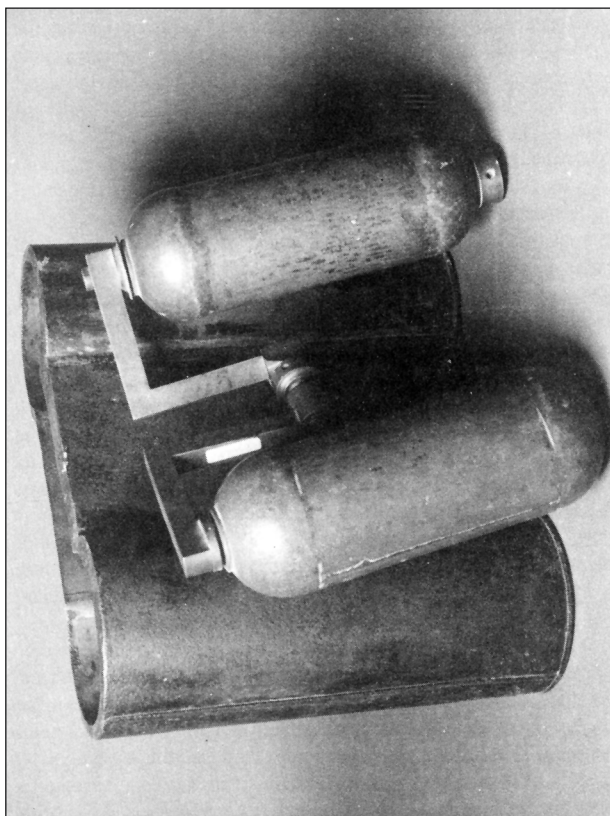
Фокс считает несомненным преимуществом отсутствие у Джоуля университетского образования. Университетский курс физики был ориентирован

на механику И.Ньютона; у Ньютона отсутствовало и понятие работы, и собственно представление о сохраняющихся величинах. Выпускники университета, вероятней всего, разделяли эти идеи. Понятие о механическом эквиваленте теплоты возникло у Джоуля, полагает Фокс, именно потому, что он, как житель крупнейшего промышленного центра викторианской Англии, был ориентирован на профессиональный язык инженеров, в котором понятие механической работы было востребовано. Шансы Джоуля на успех начатых измерений, казалось бы, должна была снижать необходимость работать на пивоварне, ведь заниматься исследованиями он мог только в свободное от работы время.

Однако, как показало исследование Х.О.Зибу-ма из берлинского Института истории науки Общества имени М.Планка, на самом деле ситуация была не так проста. Вот как описал Зибум работу Джоуля в пивоварне: *Благодаря опытам по механическому и химическому разложению органических веществ для него сделалось самоочевидным, что трение может быть источником тепла, а не только препятствием, над преодолением которого должны трудиться инженеры... За двадцать лет существования в мире пивоварения Джоуль приобрел особое операциональное знание, которое пригодилось ему в его новом качестве физика. Приобретенные им навыки восприятия и измерения температуры стали самоочевидными методами в его экспериментах по определению механического эквивалента теплоты* [16, с.35–36].

Отсутствие обратной связи, безразличие коллег (реакция членов «Lit & Phil» стала исключением) — такие факторы, безусловно, не способствовали исследовательскому оптимизму Джоуля. В то же время даже доброжелательная критика коллег могла поколебать убежденность Джоуля в правильности выбранного им пути. Неслучайно в книге «Наука в викторианском Манчестере» посвященная Джоулю глава называется «James Joule as Devotee» [13]. Слово *devotee* имеет несколько значений, лучше всего данному контексту соответствуют такие варианты перевода: «посвятивший себя» и «подвижник».

В начале статьи, сравнивая Джоуля и Ленца, я отметил противоположность их «социальных портретов». По понятным причинам декан Ленц не мог позволить себе то, что позволял владелец физической лаборатории Джоуль: в течение нескольких лет фактически решать одну задачу (прецизионное измерение механического эквивалента теплоты) и выдерживать безразличие научного сообщества к своей деятельности.



Цилиндры и калориметр, использовавшиеся Джоулем в экспериментах в 1844 г. [7, p.65].

Завершая статью, вернусь к ее началу — к теме именных законов. Привычное нашему уху словосочетание *закон Джоуля—Ленца* не всегда было таким. Симпатии и антипатии в отношении этих двух ученых могли проявиться самым неожиданным образом... Так, неожиданное именование закона теплового действия тока мы встречаем в вышедшем в 1847 г. трактате Г.Л.Ф. фон Гельмгольца «О сохранении силы» — так сказать, главной книге в истории закона сохранения энергии. Естественно, в трактате обсуждается тема выделения тепла в проводниках с током. Гельмголец пишет: *...выделение тепла при протекании тока по металлическому проводнику называется законом Ленца* [18, с.15]. Впрочем, чуть ниже он вспоминает и Джоуля — как исследователя, подтвердившего закон Ленца

в случае электролиза. Для Гельмгольца игнорирование Джоуля как соавтора закона, скорее всего, связано с недоверием к точности его экспериментов — недоверие, сформировавшееся при знакомстве с первыми опытами Джоуля по измерению механического эквивалента теплоты. Напомню, что в одном из таких экспериментов Джоуль в качестве результата представил среднее значение нескольких измерений, существенно отличавшихся друг от друга. Замечу, что спустя 100 с лишним лет в своей книге о законе сохранения энергии израильский историк науки И.Элкана приводит фразу Г.Л.Ф. фон Гельмгольца без какого-либо комментария (видимо, соглашаясь с ним) [19, p.127].

Второй пример относится к книге М.Планка, представителя уже следующего за Г.Л.Ф. фон Гельмгольцем поколения физиков: его книга «Принцип сохранения энергии» была опубликована через четыре десятилетия после трактата Гельмгольца. К тому времени формальный и неформальный статус Джоуля в научном сообществе был весьма высоким. Планк, однако, не сделал свой выбор: упоминая *джоулево тепло*, он пишет в скобках *тепло Ленца* [20, с.125], а закон теплового действия тока в одном месте называет *законом Ленца (Джоуля)** [20, с.101], в другом — просто *законом Ленца* [20, с.108].

Ближе всех к исторической правде оказались П.Лакур и Я.Аппел, авторы «Исторической физики»: *Полное объяснение теплового действия электрического тока было впервые дано Джоулем*. При этом они замечают, что результаты Джоуля были подтверждены Ленцем. Лакур и Аппель подчеркивают связь открытого Джоулем закона с его последующими измерениями механического эквивалента теплоты: *...это было сделано при помощи тех же опытов, которыми он начал свои исследования над определением теплового эквивалента* [21, с.368].

В дальнейшем, когда детали открытия стали достоянием истории, закон приобрел современный вид, и в привычном для нас названии *закон Джоуля—Ленца* первым упомянут тот, кто действительно был первым: Джеймс Прескотт Джоуль. ■

* В русском переводе книги Планка Джоуль назван Джаулом.

Автор благодарит Н.Б.Булюбаши и Я.Г.Мосиондза за помощь в работе при подготовке статьи.

Литература / References

1. Joule J. On the producing of Heat by Voltaic Electricity. Proceedings of the Royal Society. 1840; 4: 280–282
2. Joule J. On the Heat evolved in metallic Conductors of Electricity and in the Cells of a battery during Electrolysis. Philosophical Magazine. 1841; 19(124): 260–277.
3. Lentz E. Ueber die Gesetze der Wärmeentwicklung durch den galvanischen strome. Pt.I. Annalen der Physik und Chemistry. 1843; LIX: 203–239.

4. *Lentz E.* Ueber die Gesetze der Wärmeentwicklung durch den galvanischen strome. Pt.II. Annalen der Physic und Chemistry. 1844; LXI: 18–49.
5. *Ленц Э.* О законах выделения тепла электрическим током. *Ленц Э.Х.* Избранные труды. М., 1950; 360–446. [*Lentz E.* About the laws of heat evolving by electric current. *Lentz E.* Selected works. Moscow, 1950; 360–446. (In Russ.).]
6. *Яроцкий А.В.* Борис Семенович Якоби. М., 1988. [*Yarotsky A.V.* Boris Semenovich Jacobi. Moscow, 1988. (In Russ.).]
7. *Cardwell D.* James Joule: A biography. Manchester, 1989.
8. *Лежнева О.А., Ржонсинский Б.Н.* Эмилий Христианович Ленц. М.; Л., 1952. [*Lezhneva O.A. Rzhonsninsky B.N.* Emiliy Khristianovich Lentz. Moscow; Leningrad, 1952. (In Russ.).]
9. Geschichte der Physik: Ein Abri. Ed: W.Schreier. Berlin, 1988.
10. *Fox R.M.* James Prescott Joule. Mid-Nineteenth-Century Scientists. L.; N.Y.; Toronto; Paris, 1969; 72–103.
11. *Розенбергер Ф.* История физики. Ч.3, Вып.2. М.; Л., 1936. [*Rosenberger F.* History of physics. Pt.3, Is.2. Moscow; Leningrad, 1936. (In Russ.).]
12. *Кравец Т.П.* О работах Ленца в области электромагнетизма. *Ленц Э.Х.* Избранные труды. М., 1950; 465–474. [*Kravetz T.P.* On Lenz's work in the field of electromagnetism. *Lentz. Selected works.* Moscow, 1950; 465–474 (in Russ.).]
13. *Kargon R.H.* James Joule as Devotee. *Kargon R.H.* Science in Victorian Manchester: Enterprise and Expertise. Manchester, 1977, 49–60.
14. *Joule J.P.* On the electric Origin of the heat of Combustion. Philosophical Magazine. Ser.3. 1841; 20: 129, 98–113.
15. *Joule J.* On the caloric effects of magneto- electricity and on the mechanical value of heat. Philosophical Magazine. 1843; 23: 263–276, 347–355, 435–443.
16. *Зибум Х.О.* Воспроизведение экспериментов по определению механического эквивалента теплоты: точность инструментов и правильность измерений в ранневикторианской Англии. Вопросы истории естествознания и техники. 1998; 1: 9–46. [*Sibum H.O.* Reworking the Mechanical Value of Heat. Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England. Studies in the History of Science and Technology. 1998; 1: 9–46. (In Russ.).]
17. *Kipnis N.M.* Thermodynamics and Mechanical Equivalent of Heat. Science & Education. 2014; 23: 2007–2044.
18. *Гельмгольц Г.* О сохранении силы. М.; Л., 1934. [*Helmholtz H.* On the preservation of force. Moscow; Leningrad, 1934 (In Russ.).]
19. *Elkana Y.* The discovery of the concept of energy. London, 1974.
20. *Планк М.* Принцип сохранения энергии. М.; Л., 1938. [*Planck M.* The principle of energy conservation. Moscow; Leningrad, 1938. (In Russ.).]
21. *Лакур П., Анпель Я.* Историческая физика. Т.2. Одесса, 1908. [*Lakur P, Appel Ya.* Hustrorical physics. V.2. Odessa, 1908. (In Russ.).]
22. *Burgess R.* Portraits of doctors & scientists in the Wellcome Institute. London, 1973.

Joule—Lenz Law: Faces, Ideas, and Experiments

B.V.Bulyubash

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)

The history of the discovery of the law of heating effect of an electric current is considered. The contribution of two authors of the law—the English physicist James Joule and the Russian physicist Emilia Lenz—is compared. For both Joule and Lenz, the establishment of the law was preceded by a period of fascination with designing electric motors. It is emphasized that for Joule the discovery of the law of heating effect of an electric current was the beginning of experiments to determine the mechanical equivalent of heat. Joule's experiments with induction currents were of great importance for understanding the law of heating effect of a current. Joule's active participation in the work of scientific societies is noted.

Keywords: Joule, Lenz, Joule heating, mechanical equivalent of heat, law of conservation of energy, history of electric motor.