



---

## Дж. Джоуль

1818—1889

---

### Об определении механического эквивалента тепла

В сложной истории установления закона сохранения энергии важным элементом явились экспериментальные исследования, которыми была доказана возможность превращения одной формы энергии в другую. Однако длительное время эти исследования имели чисто качественный характер или проводившиеся измерения были очень грубыми. Решающую роль в переходе к точным количественным экспериментам в этой области сыграли исследования английского ученого Дж. Джоуля.

**Д**жемс Прескотт Джоуль родился 24 декабря 1818 г. в местечке Санфорд близ Манчестера в семье владельца пивоваренного завода. Джоуль получил неплохое домашнее образование. Его в течение нескольких лет учил элементарной математике, натуральной философии (физике) и началам химии известный английский физикохимик Дж. Дальтон. Общение с Дальтоном оказало значительное влияние на формирование научных интересов Джоуля и его подхода к изучению физических явлений. Следует отметить, что Джоуль так и не получил формального образования, что впоследствии сказалось на его научной судьбе: слабое знание математики не позволило ему в полной мере принять участие в разработке теоретических основ термодинамики.

Экспериментальные исследования Джоуль начал рано — в двенадцать лет — под влиянием одного знакомого любителя естествознания. Занявшись изучением магнитных явлений, Джоуль в 1840 г. обнаружил эффект магнитного насыщения, а в 1842 г. открыл явление магнитострикции. Однако не эти исследования принесли Джоулю мировую известность. Параллельно с изучением магнитных явлений он занимался определением эффективности электрических машин. При проведении соответствующих опытов проявилось стремление Джоуля к постановке количественных исследований — впоследствии оно стало наиболее характерной чертой его научного творчества.

Поначалу Джоуль полагал, что электромагниты могут быть источником бесконечно большого количества механической ра-

боты. Однако очень скоро он убедился, что это не так, и пришел к пессимистическому выводу о превосходстве паровых машин над электрическими.

Под влиянием работ Фарадея в 1840 г. Джоуль обратился к изучению тепловых эффектов тока, результатом которого стало открытие закона, называющегося теперь законом Джоуля — Ленца (в 1842 г. независимо от Джоуля закон теплового действия тока был открыт русским физиком Э. Х. Ленцем). Интересно, что работа Джоуля с описанием этих опытов была первоначально без интереса воспринята Лондонским Королевским обществом, и Джоулю пришлось ее опубликовать в трудах Манчестерского литературного и философского общества. После завершения исследований тепловых эффектов тока в 1843 г. перед ученым встала новая проблема: доказательство существования количественного соотношения между «силами» различной природы, приводящими к выделению теплоты. Первые опыты Джоуля в этом направлении состояли в измерении нагрева жидкости, помещенной в постоянное магнитное поле, в которой под действием опускающегося груза вращался небольшой электромагнит. Так в 1843 г. Джоулю впервые удалось определить механический эквивалент теплоты (в современных единицах этот эквивалент был равен 4,5 Дж/кал). В последующие годы эта величина определялась и другими методами: путем измерения теплоты, выделявшейся при продавливании определенного количества жидкости сквозь узкие трубы (1844), на основе определения количества теплоты, выделявшейся при сжатии газа (1845), и, наконец, при сравнении механической работы, затраченной на вращение мешалки в сосуде, наполненном жидкостью, с теплотой, образовавшейся при трении и обусловившей нагревание этой жидкости (1847). Все эти многочисленные опыты привели Джоуля к убеждению, что «могучие силы природы, созданные велением творца, неразрушимы и что во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точно эквивалентное количество теплоты».

В 1847 г. Джоуль познакомился с У. Томсоном, который очень высоко оценил его экспериментальное искусство. Именно опыты Джоуля заставили Томсона окончательно перейти на позиции кинетической теории тепла. Результатом сотрудничества Томсона и Джоуля стало открытие эффекта изменения температуры газа при его адиабатическом протекании через пористую перегородку (1852—1854), называемого теперь эффектом Джоуля — Томсона.

К концу 40-х годов авторитет Джоуля в научном мире упрочился. В 1850 г. он был избран членом ЛКО. В 1867 г. комиссия Британской ассоциации содействия развитию науки, занимавшаяся разработкой эталона электрического сопротивления, предложила Джоулю провести особо точные измерения механического эквивалента теплоты. Опыты Джоуля, поставленные по предложенной У. Томсоном схеме, дали расхождение этой

величины, определенной с помощью предложенного эталона, со значением механического эквивалента, полученного из чисто механических опытов. Повторение экспериментов с мешалкой подтвердило правильность последнего значения, что заставил комиссию пересмотреть предложенный эталон сопротивления (1878). Таким образом, опыты Джоуля имели не только принципиальное, но и важное практическое значение для развития физики середины XIX в.

Следует отметить, что Джоуль не был чистым эмпириком и на протяжении всей жизни интересовался вопросами физической теории. Так, в 1848 г., после завершения цикла опытов по определению механического эквивалента теплоты, Джоуль выступил с докладом, в котором изложил свои теоретические представления о природе теплоты и физических свойствах газов. Основываясь на представлении о молекулах газа как упругих шариках, Джоуль рассматривал давление газа как результат ударов его молекул о стенки сосуда. Ученому удалось оценить скорость молекул водорода ( $\approx 1850$  м/с), он попытался рассчитать теплоемкость этого газа. Не все в этой работе Джоуля оказалось правильным, но ее высоко оценили другие исследователи, в частности Р. Клаузиус, по инициативе которого она была напечатана в журнале ЛКО «Philosophical Transactions».

На первом этапе своей научной работы Джоуль ставил эксперименты на собственные средства. Однако, поскольку он никогда серьезно не занимался коммерческой деятельностью, постепенно его финансовое положение стало ухудшаться. К концу жизни он был вынужден пользоваться материальной помощью ряда научных организаций, а в 1878 г. благодаря усилиям друзей ему была назначена государственная пенсия. Джоуль никогда не отличался крепким здоровьем, а напряженная научная работа окончательно подорвала его силы. В последние годы жизни он тяжело болел и почти не мог работать. Ученый умер 11 октября 1889 г.

## О механическом эквиваленте теплоты

---

(...) Из объяснения, данного графом Румфордом<sup>1</sup> относительно теплоты, происходящей от трения твердых тел, можно предвидеть, как нечто само собой разумеющееся, что превращение теплоты должно отмечаться и при трении жидких и газообразных тел. Более того, существует много фактов, таких, как, например, теплота моря после нескольких дней штормовой погоды, которые уже давно повсеместно приписываются трению жидкости. Тем не менее научный мир, исповедующий преимущественно гипотезу, что теплота есть субстанция, и следующий выводам, полученным Пикте<sup>2</sup> из недостаточно тонких экспериментов, почти единодушно отрицает возможность генерации теплоты этим

путем. Насколько я знаю, первое замечание о преобразовании теплоты при трении жидкости было сделано в 1842 г. Майером<sup>3</sup>, который утверждал, что поднял температуру воды с 12 до 13°C путем ее перемешивания, однако без указания количества использованной силы или предосторожностей, соблюдавшихся для гарантии правильного результата. В 1843 г. я обнаружил факт, что «теплота выделяется при прохождении жидкости через узкие трубы<sup>4</sup> и что каждый градус теплоты на один фунт воды требует для его преобразования этим способом механической силы, составляющей 770 футо-фунтов. Далее, в 1845 г.<sup>5</sup> и 1847 г.<sup>6</sup> для создания трения жидкости я применил гребное колесо и получил эквиваленты 781,5, 782,1 и 787,6 при перемешивании соответственно воды, семенного масла и ртути. Результаты, столь близко совпадающие между собой и с другими результатами, полученными ранее из экспериментов с упругими жидкостями и электромагнитной машиной, не оставляют, по моему мнению, сомнений в существовании соотношения эквивалентности между силой и теплотой; и все-таки представлялось чрезвычайно важным определить это соотношение с еще большей точностью. Это я попытался сделать в настоящей работе.

**Описание прибора.** Использувавшиеся термометры имели трубки, калиброванные и градуированные по методу, впервые указанному Реньо. Два из них, которые я буду обозначать *A* и *B*, сделаны Дэнсером из Манчестера; третий, обозначаемый *C*, был изготовлен Фастре из Парижа. Градуировка этих приборов была настолько совершенной, что при сравнении между собой их показания совпадали с точностью примерно до 1/100°F. Я также располагал другим точным прибором, изготовленным Дэнсером, шкала которого захватывала как точку замерзания, так и точку кипения. Последняя точка этого эталонного термометра была получена обычным образом, путем погружения шарика и ножки в поток пара, восходящего от значительного количества чистой воды, которая находилась в состоянии бурного кипения. Во время проведения опыта барометр стоял на 29,94 дюйма, а температура воздуха была 50°F; так что наблюдавшаяся точка требовала очень незначительной поправки для сведения ее к 0,760 м и 0°C, т. е. давлению, принятому во Франции и, я полагаю, повсюду на континенте для определения точки кипения, которое использовано мной ранее в связи с рядом точных термометрических исследований\*. Значения шкал термометров *A* и *B* проверялись при погружении их вместе с эталонным термометром в большие объемы воды, которая поддерживалась при различной тем-

---

\* Барометрическое давление в 30 дюймов ртутного столба при 60°F широко используется у нас в стране, и это, по счастью, почти в точности согласуется с континентальным стандартом. В «Докладе Комитета, назначенного Королевским обществом для рассмотрения наилучшего метода установления фиксированных точек термометров» рекомендуется барометрическое давление 29,8 дюйма, но не указана температура — удивительное упущение в работе, столь точной в других отношениях.

пературе. Значение шкалы *C* определялось сравнением с *A*. Было обнаружено, что число делений, соответствующих  $1^{\circ}\text{F}$ , в термометрах *A*, *B* и *C* было 12,951, 9,829 и 11,647 соответственно. И поскольку постоянная практика позволила мне считать невооруженным глазом до  $1/20$  деления, отсюда следует, что доступная оценке температура составляла  $1/200^{\circ}\text{F}$ .

На рис. 89 представлено вертикальное, а на рис. 90 — горизонтальное сечения прибора для создания трения воды, который состоял из латунного гребного колеса, снабженного восемью рядами вращающихся лопастей *a, a* и т. д., движущихся между четырьмя рядами неподвижных лопаток *b, b* и т. д., прикрепленных к раме, сделанной также из листовой латуни. Латунная ось гребного колеса свободно вращалась, без вибраций, на опорах *c, c*; в точке *d* она разделялась на две части куском самшита для предотвращения передачи теплоты в этом направлении.

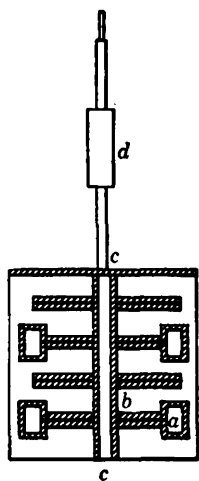


Рис. 89

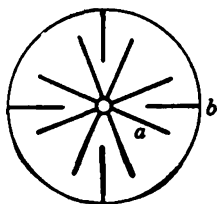


Рис. 90

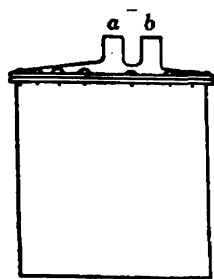


Рис. 91

На рис. 91 представлен медный сосуд, внутри него жестко устанавливалось вращающееся устройство. Сосуд имел медную крышку, край которой был покрыт очень тонкой кожаной шайбой, пропитанной свинцовыми белилами. Крышка могла герметически привинчиваться к краю медного сосуда. Она имела две трубки *a, b*. Первая была сделана для того, чтобы ось вращалась без касания, а вторая — для установки термометра.⟨...⟩

На рис. 92 показано устройство, использовавшееся для приведения в движение прибора трения. Здесь *aa* — деревянные блоки диаметром 1 фут и толщиной 2 дюйма, имевшие деревянные валы *bb, bb* диаметром 2 дюйма и стальные оси *cc, cc* диаметром в четверть дюйма. Блоки были хорошо подогнаны и равны друг другу. Их оси поддерживались латунными фрикционными колесами *dddd, dddd*, стальные оси которых вращались в отверстиях,

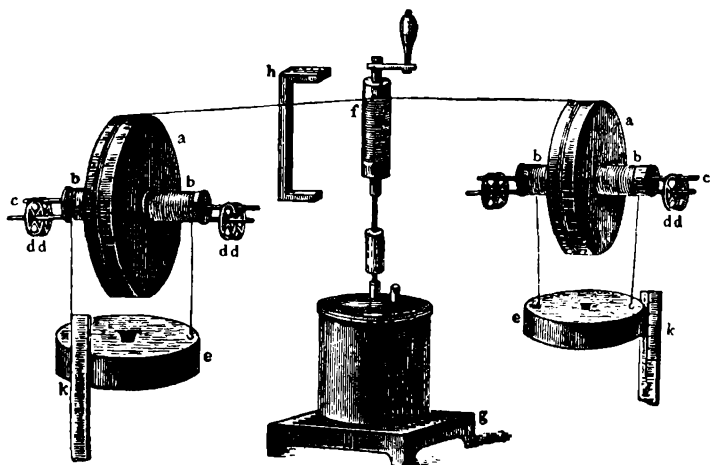


Рис. 92

высверленных в латунных пластинках, прикрепленных к очень массивной раме, которая жестко фиксировалась на стене помещения\*.

В части нижеследующих экспериментов использовались свинцовые грузы *ee*, которые весили около 29 фунтов, а в других — вес грузов составлял около 10 фунтов каждый; они подвешивались на нитях, свисавших с валов *bb*, *bb*. Тонкий шпагат, прикрепленный к блокам *aa*, соединял их с центральным валом *f*, который с помощью шпильки мог легко присоединяться к оси прибора трения или отсоединяться от нее.

В деревянной скамейке *g*, на которой стоял прибор трения, был сделан ряд поперечных щелей, вырезанных так, чтобы лишь немногие точки дерева находились в контакте с металлом, в то время как воздух имел свободный доступ почти ко всем его частям. Таким способом предотвращалась передача теплоты веществам скамейки.

Большой деревянный экран (не показанный на рисунке) полностью исключал эффекты теплового излучения от тела экспериментатора.

Метод проведения опытов состоял в следующем. Определялась температура прибора трения, грузы удерживались в подвешенном состоянии с помощью подставки *h*, и вал прикреплялся к оси. Затем посредством узких деревянных градуированных полосок *k, k* определялось точное положение грузов над землей, вал освобождался и ему давали возможность вращаться до тех пор, пока грузы не достигали вымощенного плитам пола лабора-

\* Это был просторный подвал, который обладал преимуществом однородности температуры, намного превышавшей однородность температуры любой другой лаборатории из тех, которыми я мог пользоваться.

тории, опускаясь примерно на 63 дюйма. Вслед за этим вал снова устанавливался на подставку, грузы снова поднимались и трение возобновлялось. После того как эта процедура повторялась двадцать раз, эксперимент завершался новым наблюдением температуры прибора. Средняя температура лаборатории определялась в начале, в середине и при завершении каждого эксперимента.

Непосредственно перед каждым опытом или сразу после него я проводил проверку воздействия изучения или передачи теплоты телу из атмосферы или в обратном направлении, понижая или повышая температуру прибора трения. При этих проверках положение аппарата, количество содержащейся в нем воды, время проверки, метод наблюдения [показаний] термометров, положение экспериментатора — короче говоря, все условия, за исключением того, что аппарат покоился, были такими же, как и в экспериментах, в которых наблюдался эффект трения.

**Первая серия экспериментов. Трение воды.** Вес свинцовых грузов вместе с частью веса соединенных с ними нитей, служивший для увеличения давления, был равен 203066 и 203086 гранов. Скорость опускания грузов составляла 2,42 дюйма в секунду. Время, которое занимал каждый эксперимент, 35 минут. Для определения температуры воды служил термометр А. Температура воздуха регистрировалась термометром В.

Из различных экспериментов (см. табл.), где наблюдалось воздействие изучения, можно легко получить, что влияние температуры окружающего воздуха на прибор равно  $0,0465^{\circ}\text{F}$  для каждого грудуса разности между средними температурами воздуха и прибора. Поскольку превышение температуры атмосферы над температурой прибора составляло в среднем в экспериментах с излучением  $0,32295^{\circ}\text{F}$  и только  $0,305075^{\circ}\text{F}$  в среднем в экспериментах с трением, то отсюда следует, что необходимо прибавить  $0,000832^{\circ}\text{F}$  к разности между  $0,57525^{\circ}\text{F}$  и  $0,012975^{\circ}\text{F}$ , и результат, равный  $0,563107^{\circ}\text{F}$ , будет приближенно эффектом нагрева от трения. Но к этой величине нужно сделать небольшую поправку, которая учитывает, что в качестве истинной средней температуры в каждом эксперименте с трением бралось среднее значение температуры в начале и по завершении опыта, что не соответствует действительности в точности, поскольку в конце эксперимента, когда вода уже стала теплее, повышение температуры шло несколько медленнее. Вследствие этого средняя температура прибора в опытах с трением должна считаться на  $0,002184^{\circ}\text{F}$  выше, что уменьшает эффект нагрева за счет атмосферы на  $0,000102^{\circ}\text{F}$ . Эта величина, прибавленная к  $0,563107^{\circ}\text{F}$ , дает в качестве истинного среднего увеличения температуры благодаря трению воды величину  $0,563209^{\circ}\text{F}^*$ .

\* Следует заметить, что повышение температуры есть величина составная, зависящая частично от трения воды, а частично — от трения вертикальной оси прибора в ее опорах и трения в опорах [см. рис. 101]. Однако последний источник тепла составлял примерно 1/80 первого. (...)

Номер опыта и причина изменения температуры	Общая высота падения тел в доймах	Средняя темпера- тура воздуха	Разность между сред- ним значением данных столб- цов 5 и 6 и данных столб- ца 3	Температура прибора		Приобретение или потери теплоты в опыте
				начало опыта	конец опыта	
1	2	3	4	5	6	7
1 Трение	1256,96	57,698	2,252—	55,118	55,774	0,656 получено
1 Излучение	0	57,868	2,040—	55,774	55,882	0,108 »
2 Трение	1255,16	58,085	1,875—	55,882	56,539	0,657 »
2 Излучение	0	58,370	1,789—	56,539	56,624	0,085 »
3 Трение	1253,66	60,788	1,596—	58,870	59,515	0,645 »
3 Излучение	0	60,926	1,373—	59,515	59,592	0,077 »
4 Трение	1252,74	61,001	1,110—	59,592	60,191	0,599 »
4 Излучение	0	60,890	0,684—	60,191	60,222	0,031 »
5 Трение	1251,81	60,940	0,431—	60,222	60,797	0,575 »
5 Излучение	0	61,035	0,237—	60,797	60,799	0,002 »
6 Излучение	0	59,675	0,125+	59,807	59,795	0,010 потеряно
6 Трение	1254,71	59,919	0,157+	59,795	60,375	0,562 получено
7 Излучение	0	59,888	0,209—	59,677	59,681	0,004 »
7 Трение	1254,02	60,076	0,111—	59,681	60,249	0,568 »
8 Излучение	0	58,240	0,609+	58,871	58,828	0,043 потеряно
8 Трение	1251,22	58,237	0,842+	58,828	59,330	0,502 получено
9 Трение	1253,92	55,328	0,070+	55,118	55,678	0,560 »
9 Излучение	0	55,528	0,148+	55,678	55,674	0,004 потеряно
10 Излучение	0	54,941	0,324—	54,614	54,620	0,006 получено
10 Трение	1257,96	54,985	0,085—	54,620	55,180	0,560 »
40 Трение	1262,99	56,108	0,100+	55,929	56,488	0,559 »
40 Излучение	0	56,454	0,036—	56,488	56,492	0,004 »
Среднее для трения	1260,248	— — —	0,305075—	— — —	— — —	0,575250 »
Среднее для излучения	0	— — —	0,322950—	— — —	— — —	0,012975 »

[Таблица приводится в сокращении.]

Для оценки абсолютной величины выделенной теплоты необходимо было найти теплоемкость медного сосуда и латунного гребного колеса. Теплоемкость сосуда может быть легко найдена по данным Реньо относительно удельной теплоемкости меди. Таким образом, теплоемкость 25 541 гранов меди\*  $\times 0,09512 =$   $=$  теплоемкости 2430,2 грана воды. Серия из семи очень тщательных экспериментов с латунным гребным колесом после внесения всех необходимых поправок на теплоту, возникающую вследствие контакта воды с поверхностью металла и т. д., привела меня к значению его теплоемкости, соответствующей теплоемкости 1783 гранов воды. Однако из-за [большой] величины этих поправок, составлявших до одной тридцатой полной тепло-

\* Шайба, весившая всего 38 гранов, в этих оценках принималась за медную.



емкости, я предпочел воспользоваться правилом Реньо, а именно: *теплоемкость металлических сплавов равна сумме теплоемкостей металлов, их составляющих*<sup>7</sup>. Анализ части колеса показал, что оно состоит из очень чистой латуни, содержащей 3933 грана цинка на 14 968 гранов меди. Следовательно,

теплоемкость 14 968 гранов меди	× 0,09515	= теплоемкости
		1424,2 грана воды
теплоемкость 3933 гранов цинка	× 0,09555	= теплоемкости
		375,8 грана воды

**Общая теплоемкость латунного колеса = теплоемкости 1800 гранов воды**

Теплоемкость латунной пробки, вставленной в горловину во избежание контакта воздуха с водой, равна теплоемкости 10,3 грана воды. Теплоемкость термометра не определялась, поскольку перед погружением ему всегда придавалась ожидаемая температура. Таким образом, общая теплоемкость прибора составляла:

Вода . . . . .	93229,7
Медь, приведенная к воде . . . . .	2430,2
Латунь, приведенная к воде . . . . .	1810,3
<hr/>	
В с е г о	97470,2

Итак, общее количество выделенной теплоты составило 0,563209°F в 97470,2 гранах воды, или, другими словами, 1°F в 7,842299 фунтах воды.

Оценка силы, приложенной при генерации этой теплоты, может быть выполнена следующим образом. Грузы в сумме составляли 406 152 грана, откуда нужно вычесть трение, возникающее в блоках, и жесткость нити, что делалось путем соединения двух блоков со шпагатом, проходящим вокруг валов, по диаметру равных тем, которые использовались в опытах. Оказалось, что в этих условиях вес груза, который необходимо добавить к одному из свинцовых грузов, чтобы привести их в равномерное движение, равен 2955 грамам. Тот же эффект (в противоположном направлении) был получен для другого свинцового груза при добавлении 3035 гранов. Вычитая 168 гранов (трение вала в его опорах) из 3005 (среднего значения приведенных выше чисел), мы получаем величину трения в опыте, равную 2837 грамам, которая при вычитании из веса свинцовых грузов составляет 403 315 гранов как действительно приложенное давление.

Скорость, с которой свинцовые грузы падают на землю, т. е. 2,42 дюйма в секунду, эквивалентна высоте 0,0076 дюйма. Эта величина, умноженная на 20 (столько раз в каждом опыте грузы подвешивались заново), дает 0,152 дюйма. Это значение при вычитании из 1260,248 дает в качестве исправленной средней высоты, с которой падает тело, 1260,096 дюйма.

Это падение вместе с упоминавшимся выше давлением представляет силу, эквивалентную 6050,186 фунта, перемещенных на один фут. Добавление к ней  $0,8464 \cdot 20 = 16,928$  футо-фунтов, т. е. величины силы, развиваемой нитью после того, как грузы касаются земли, дает 6067,114 футо-фунтов в качестве среднего исправленного значения силы. Следовательно,  $\frac{6067,114}{7,842299} = 773,64$  футо-фунтов будет силой, которая, согласно описанным выше экспериментам с трением, эквивалентна теплоте, поднимающей температуру одного фунта воды на  $1^{\circ}\text{F}$ . (...)

---

### Комментарий

Перевод с английского отрывков из работы Джоуля выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: On the Mechanical Equivalent of Heat. «Philosophical Transactions», 1850, vol. 140, Pt. 1, p. 61—82.

- <sup>1</sup> Имеется в виду знаменитое наблюдение Румфорда выделения значительного количества теплоты при сверлении пушечных стволов (1798).
- <sup>2</sup> Речь идет, по-видимому, о работе швейцарского физика М. Пикте «О нагревании брошенных тел вследствие их трения о воздух» (1803).
- <sup>3</sup> В работе «Замечания о силах неживой природы».
- <sup>4</sup> В работе «О тепловых эффектах магнитоэлектричества и о механической величине теплоты».
- <sup>5</sup> В работе «О существовании отношения эквивалентности между теплотой и обычными формами механической силы».
- <sup>6</sup> В работе «О механическом эквиваленте теплоты, определенном по теплоте, выделяющейся при трении жидкостей».
- <sup>7</sup> Имеется в виду работа Реньо «Исследование удельной теплоемкости простых и составных тел. Мемуар 2-й: составные твердые и жидкие тела».

---

### Литература

- [1] Собрание сочинений Джоуля: The Scientific Papers of James Prescott Joule. Vols. 1—2. London, 1884—1887.
- [2] Crowther J. C. British Scientists of the Nineteenth Century. London, 1935, ch. 3.
- [3] Франкфурт У. И. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1978, гл. IV.

**Голин Г. М., Филонович С. Р.**

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3