

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1954



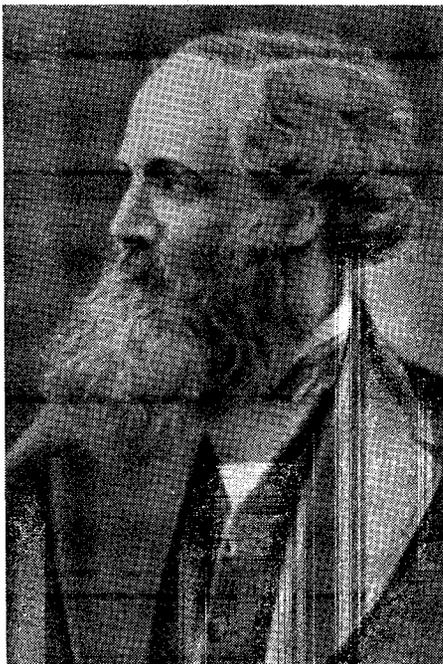
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

11

Д. К. Максвелл

К 75-летию со дня смерти

Джемс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell) — один из выдающихся творцов классической физики — родился 13 июня 1831 г. в Англии, в Гленлере вблизи Эдинбурга. Отец Джемса Максвелла происходил из знатной шотландской фамилии, по образованию он был юристом, в Гленлере у него было родовое имение. Среднее образование Д. Максвелл получил в Эдинбургской академии (1840—1847 гг.). В пятнадцать лет он представил Эдинбургскому королевскому обществу через своего учителя Форбса доклад «О черчении овалов и об овалах со многими фокусами». С 1847 г. по 1850 г. Джемс Максвелл обучался в Эдинбургском университете. Представленная им в 1850 г. работа «О равновесии упругих твердых тел» была напечатана в трудах Эдинбургского королевского общества в 1853.



В 1850 г. Максвелл направился в старейший английский университет в Кембридже — Тринити колледж, основанный еще в XIII веке. Изучая в этом колледже физико-математические науки, Максвелл проявил исключительную разносторонность своих интересов.

Окончив в 1854 г. Кембриджский университет со званием бакалавра, Максвелл вступил на путь научно-педагогической деятельности. В этот период в Англии работали знаменитые физики: М. Фарадей (1791—1867), Д. Стокс (1819—1903), Дж. Тиндаль (1820—1893), В. Томсон (1824—1907) и др.

В начале своей научной деятельности Максвелл особенно интересовался вопросами теории цветов и форм, а также теорией электромагнитных явлений. В 1855—1856 гг. он выполнил работу «О фарадеевых силовых линиях», напечатанную в докладах Британской ассоциации в 1856 г. и представляющую своего рода введение к его большим произведениям в области электромагнитных явлений.

В 1856 г. Максвелл занял кафедру натуральной философии (физики) в колледже Маришал в Абердине. Его лекции отличались строгостью, критическим рассмотрением существующих физических теорий и живостью изложения. Начатые

им оригинальные работы в области электричества были на некоторое время прерваны в связи с тем, что он занялся разрешением задачи, предложенной на премию Адамса, на тему «Движение колец Сатурна». За его работу «Об устойчивости движения колец Сатурна» ему и была присуждена премия Адамса в Кембридже.

В 1860 г. Максвелл получил кафедру физики и астрономии в Королевском колледже в Лондоне. Лондонский период жизни Максвелла насыщен интенсивными научными исследованиями, в которых наиболее ярко проявились его незаурядные творческие способности. В это время Максвелл создал свои выдающиеся работы в области кинетической теории газов и теории электромагнитного поля (1861—1865 гг.).

Кроме теоретических работ Максвелл проводил ряд экспериментальных исследований, среди которых следует отметить: первые измерения для установления стандарта сопротивления (совместно с Дженкином), определение отношения электромагнитной и электростатической единиц количества электричества для сравнения его со скоростью света, эксперименты с «коробкой цветов», эксперименты с вязкостью газов при различных давлениях и температурах.

После перенесенной в 1865 г. тяжелой болезни Максвелл все чаще оставался в своем имении в Гленлере, участвуя в педагогической работе в качестве экзаменатора. В 1868 г. он переселился в Гленлер и здесь им был создан выдающийся двухтомный труд «Трактат об электричестве и магнетизме» (Treatise on Electricity and Magnetism), изданный в 1873 г., в котором были подведены итоги его предыдущих исследований и обобщены исследования в области электромагнитных явлений крупнейших физиков середины XIX века.

В 1871 г. в Кембридже была организована новая кафедра экспериментальной физики и на должность профессора этой кафедры был приглашен Максвелл. В Кембридже Максвелл развернул большую научно-организаторскую деятельность. Он возглавил лабораторию Кэвендиша, ставшую крупнейшим центром эксперименталь-

ной физики в Англии. В эти годы Максвелл уделял большое внимание популяризации науки.

Здоровье Максвелла после 1873 г. постепенно ухудшалось; все чаще он страдал от болевых приступов в груди и 5 ноября 1879 г. он скончался. Вскоре в Лондоне вышла обстоятельная книга Кемпбелла и Гарнета, посвященная биографии Джемса Клерка Максвелла и его переписке [Л. 10].

* * *

Вторая половина XIX века, как известно, отличалась большим подъемом капиталистического промышленного производства. С его развитием было связано разрешение большого числа научных и технических проблем. Перед учеными стояли многие практические задачи; их деятельностью живо интересовалось общество, развитие производительных сил которого в большой степени зависело от успехов науки и особенно физики и химии.

В своей статье, посвященной М. Фарадею (Nature, 1873 г.), Максвелл говорил: «...вопрос о современном состоянии науки и о путях ее усовершенствования больше, чем когда-бы то ни было, занимает сейчас умы людей; в настоящее время все соглашается с тем, что это — дело всей нации и, более того — дело, имеющее фундаментальное значение» [Л. 5]. При этих условиях старые научные концепции не могли удовлетворять растущим требованиям техники. Решение главнейших задач физики уже не могло ограничиться только аналитическими или же только экспериментальными исследованиями.

Математические работы Ампера, Вебера, Гаусса и др. требовали экспериментального обоснования и развития. Соответственно исключительное значение приобрело создание экспериментальной научной базы, например организация таких научных учреждений, как лаборатория Кэвендиша, что позволяло расширить горизонты и глубину научных исследований.

Наряду с этим экспериментальные научные достижения, в частности достижения великого экспериментатора Фарадея, требовали своего теоретического обобщения и количественной разработки.

Ученые особо стали интересоваться значением эксперимента в сочетании с теоретическими исследованиями. Максвелл выступал на темы «О соотношении между физикой и математикой», «Значение эксперимента в теоретическом познании», «О математической классификации физических величин». Он говорил: «Если искусство математика позволило экспериментатору заметить, что измеряемые им количества связаны необходимыми соотношениями, то физические открытия показали математику новые формы количеств, которые он никогда бы не мог себе представить» [Л. 5].

Таких физических открытий и экспериментальных фактов было накоплено уже достаточно, но не связанные друг с другом исследования и опыты многих отдельных ученых требовали создания обобщающей их теории. Такая теория могла зародиться лишь в борьбе мнений. В этом отноше-

нии особо важное значение имели проблемы, связанные с взаимодействием тел и представлениями о строении вещества.

Вопрос о взаимодействии тел, имея свою большую историю, принял особую остроту в связи с необходимостью объяснения взаимодействий наэлектризованных и намагниченных тел. Идеалистическая по своему существу теория дальнего действия, родоначальником которой Максвелл считает Роджера Котса, имела своих сторонников в лице Ампера, Вебера, Неймана, Гаусса и др. Их работы были пронизаны математическим формализмом. Максвелл писал: «Трактаты Пуассона и Ампера были облечены в такую математическую форму, что извлечь из них какую-либо пользу мог только тот, кто тщательно изучал математику» [Л. 5]. В этих работах постулировалось, что электромагнитные действия передаются мгновенно, без участия промежуточной среды.

Уже в своей первой большой работе в области электромагнитных явлений «О фарадеевых силовых линиях» [Л. 1, 6] Максвелл ставит перед собой задачу развить идеи Фарадея о непрерывном участии промежуточной среды при взаимодействии наэлектризованных тел и электрических токов. Во введении к этой своей работе он пишет¹: «Мой метод одинаков с тем, которого придерживался Фарадей в своих исследованиях и который, хотя ему и дано уже математическое истолкование проф. Томсоном и др., еще довольно часто считают менее определенным и строгим, чем методы, употребляемые математиками-специалистами. Из моего изложения, надеюсь, будет ясно видно, что я не задаюсь целью установить какую-нибудь физическую теорию в той области науки, в которой я не произвел почти ни одного опыта, а имею намерение только показать, каким образом непосредственным применением идей и методов Фарадея лучше всего могут быть выяснены взаимные отношения различных классов открытых им явлений».

В этой первой работе Максвелл воздерживался от высказывания какой-нибудь физической теории, поясняющей явления в электромагнитном поле. Однако, разрабатывая математически метод Фарадея, основанный на представлении о физических силовых линиях поля, Максвелл пользуется аналогией между стационарными электрическими и магнитными полями и стационарным движением несжимаемой жидкости, подчеркивая неоднократно внешний характер этой аналогии.

Вторую часть этой работы Максвелл посвятил математической разработке идеи Фарадея об «электротоническом состоянии». Фарадей высказал мысль, что среда, в частности проводник, в магнитном поле находится в особом, названном им электротоническим, состоянии, и что изменение этого состояния и вызывает электродви-

¹ Выдержки из трудов Максвелла в переводе на русский язык заимствованы из изданных на русском языке книг: а) «Избранные сочинения по теории электромагнитного поля», перевод З. А. Цейтлина под ред. П. С. Кудрявцева. ГИИТЛ, 1954 и б) «Материя и движение», под ред. Н. Н. Андреева. Изд. «Природа и культура», кн. 7, 1924 [Л. 3, 6].

жащие силы в проводнике. Максвелла заинтересовала эта мысль Фарадея, хотя сам Фарадей в последующем и не развивал таких представлений.

Максвелл ввел величины, названные им электротоническими функциями или составляющими электротонической напряженности. В последующих работах Максвелл уже не развивал идею об электротоническом состоянии, но введенные им здесь величины вошли в теорию электромагнитного поля под наименованием составляющих векторного потенциала (A).

Уже в итоге этой первой работы Максвелл сформулировал шесть законов, явившихся основой его будущей теории электромагнитного поля. В переводе на современный язык² они гласят: 1) Линейный интеграл векторного потенциала по замкнутому контуру равен магнитному потоку сквозь поверхность, ограниченную этим контуром ($\oint Adl = \Phi$). 2) Магнитная индукция равна напряженности магнитного поля, умноженной на магнитную проницаемость ($B = \mu H$). 3) Линейный интеграл напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен электрическому току сквозь поверхность, ограниченную этим контуром ($\oint Hdl = i$). 4) Плотность тока в проводящей среде пропорциональна напряженности электрического поля ($\delta = \gamma E$). 5) Энергия магнитного поля пропорциональна произведению тока в контуре на магнитный поток, сцепляющийся с контуром. 6) Напряженность электрического поля, возникающего вследствие изменения магнитного поля, равна производной по времени от векторного потенциала со знаком минус ($E_{инд} = -\frac{\partial A}{\partial t}$).

В этой работе еще отсутствуют понятия о токе электрического смещения и об электромагнитных волнах.

Интересно отметить, что эта первая работа Максвелла в области электромагнитных явлений, выполненная им в двадцатипятилетнем возрасте, содержит ряд глубоких высказываний, в которых как бы намечался план его дальнейших исследований. Он уже здесь ставит перед собой задачу следовать путем широких обобщений накопленных научных результатов; он предвидит на этом пути возможность новых физических открытий. Так, приступая ко второй части своей работы, он пишет: «В последующем исследовании законы, установленные Фарадеем, будут рассматриваться как истинные и будет показано, что, развивая далее его соображения, можно вывести новые и

еще более общие законы. Если при этом окажется, что рассматриваемые законы, найденные первоначально для определенного ряда явлений, могут быть обобщены настолько, что охватят новый класс явлений, то полученные математические соотношения доставят физикам возможность открыть соотношения физические. Таким образом, отвлеченные рассуждения приобретают важное значение для опытной науки».

Последующее развитие Максвеллом его теории и предсказанные этой теорией физические явления, полностью подтвердившиеся практикой, свидетельствуют о блестящем осуществлении плана, широко задуманного Максвеллом уже в первой его работе.

Если в этой работе Максвелл стремился избежать какой-либо гипотезы о характере движения среды в электромагнитном поле, то в следующей работе «О физических силовых линиях» [Л. 1, 6] он выдвигает и развивает гипотезу о существовании молекулярных вихрей в электромагнитном поле, оси которых совпадают с направлением магнитных линий. Максвелл рисует механическую модель поля, в которой соседние вихри разделены слоями частиц, вращающихся каждая вокруг своей оси в направлении, противоположном направлению вращения вихрей. Максвелл вынужден был ввести эти частицы, так как иначе соприкасающиеся части соседних вихрей должны были двигаться в противоположные стороны, что трудно себе представить. Далее Максвелл предполагает, что если скорости вращения соседних вихрей таковы, что расположенные между ними частицы получают, кроме вращательного, также и поступательное движение, то это их поступательное движение и есть электрический ток. Таким образом, частицы между вихрями являются, по Максвеллу, частицами электричества. Индуцированное электрическое поле согласно модели Максвелла «возникает при взаимодействии между вихрями и находящимися между ними частицами, когда скорость вращения вихрей изменяется в какой-нибудь части поля», т. е. индуцированное электрическое поле возникает при изменении поля магнитного.

В этой работе Максвелл впервые вводит понятия об электрическом смещении и о токе смещения в диэлектрике, являющиеся основой последующей его теории. Он пишет: «Мы можем полагать, что в диэлектрике, находящемся под действием индукции, электричество в каждой молекуле смещено так, что одна сторона молекулы становится наэлектризованной положительно, а другая отрицательно, но что электричество остается полностью связанным с молекулой и не переходит от одной молекулы к другой. Результат этого действия на всю массу диэлектрика выражается в образовании общего смещения электричества в определенном направлении. Это смещение не представляет собой ток, потому что, достигнув определенной величины, оно остается постоянным. Но это есть начало тока, и изменения смещения образуют токи в положительном или отрицательном направлении в зависимости от того, увеличивается ли смещение или уменьшает-

² Одной из задач настоящего очерка является передача в возможно ясной для современного читателя форме представления о творческом пути, по которому прошел Максвелл при создании своего учения об электромагнитных явлениях. Поэтому основные законы, установленные Максвеллом, сформулированы в этом очерке с использованием современной терминологии и обозначений. С оригинальными формулировками Максвелла читатели могут ознакомиться в подлинниках и имеющихся на русском языке переводах трудов Максвелла [Л. 5, 6].

ся». Далее он выражает плотность тока смещения в виде производной по времени от электрического смещения и подчеркивает, что «эти соотношения не зависят от какой-либо теории, касающейся внутреннего механизма диэлектриков».

Обращаясь же к рассматриваемой им механической модели, Максвелл считает, что электрическое смещение есть результат упругих свойств ячеек поля, заполненных принимающей участие в вихревом движении материи. Это смещение, или упругая деформация ячеек, возникает под воздействием напряженности электрического поля, т. е. в результате тангенциальных усилий, передаваемых стенкам ячеек от расположенных между ячейками частиц. Далее Максвелл ставит задачу «Найти скорость распространения поперечных колебаний через упругую среду, из которой состоят ячейки...» и, пользуясь уравнениями, ранее полученными в этой же работе, и уравнением теории упругости, получает, что эта скорость должна быть равна отношению электромагнитной единицы к электростатической единице количества электричества. Сравнивая это отношение, полученное из опытов Вебера и Кольрауша (310 740 000 м/сек), со скоростью света по определению Физо (314 858 000 м/сек), Максвелл высказывает мысль, имевшую решающее значение для развития электромагнитной теории света, что «...свет состоит из поперечных колебаний той же среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений» (курсив Максвелла!). Интересно отметить, что оба числа (Вебера — Кольрауша и Физо) не точны, но отклоняются от истинного значения в одну и ту же сторону.

Существенно отметить, что здесь Максвелл еще не исследует волновых процессов в электромагнитном поле и не определяет скорости распространения электромагнитных волн. Как правильно замечает Больцман в своих комментариях к переводу труда Максвелла на немецкий язык, волновой характер и скорость распространения электромагнитного поля вытекают из данных Максвеллом уравнений поля без помощи какой-либо механической модели, что и было сделано Максвеллом в следующей его работе.

Сам Максвелл, формулируя основные характеристики своей модели, говорит: «Я не выставляю эту концепцию как истинное отображение связей, существующих в действительности, и даже в качестве гипотезы о сущности электричества. Этот способ связи, однако, механически мыслим, и он легко может быть исследован и приспособлен к выявлению действительных механических отношений между известными электромагнитными явлениями. Я осмеливаюсь поэтому утверждать, что всякий, кто понимает предварительный и временный характер этой гипотезы, найдет, что она ему скорее помогает, чем мешает в его поисках истинного истолкования явлений».

И действительно, уже в следующей своей фундаментальной работе «Динамическая теория электромагнитного поля» [Л. 1, 6], в которой полностью формулируется математически эта теория,

Максвелл уже не обращается к своей механической модели поля, а говорит только о передаче движения от одной части среды к другой с большой, но не бесконечной скоростью.

Максвелл в следующих словах определяет развиваемую им теорию: «Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления».

В этой работе Максвелл дает уже в завершенной форме свою систему уравнений электромагнитного поля. Приводим их в современных обозначениях в векторной форме.

В дополнение к записанным в дифференциальной форме первым четырем уравнениям, содержащимся в первой работе Максвелла, а именно:

$$\mathbf{V} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{H}, \quad (2)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \delta, \quad (3)$$

$$\delta_{np} = \gamma \mathbf{E}, \quad (4)$$

где δ_{np} — плотность тока проводимости, Максвелл расширяет понятие электрического тока, включая в него и ток электрического смещения, и соответственно для плотности полного тока получает выражение

$$\delta = \delta_{np} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (5)$$

Выражение для напряженности электрического поля Максвелл расширяет, добавляя к составляющей, определяемой изменением магнитного поля, потенциальную составляющую и составляющую, определяемую движением проводника со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле. В итоге получает выражение:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } U + [\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}]. \quad (6)$$

где U — скалярный потенциал электромагнитного поля.

Вводя вектор электрического смещения, Максвелл записывает связь его с вектором напряженности электрического поля:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (7)$$

называя это соотношение уравнением электрической упругости. Фундаментальное значение в теории Максвелла имеет соотношение:

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (8)$$

обобщаемое для любого, сколь угодно быстро изменяющегося поля, и называемое Максвеллом уравнением свободного электричества.

Наконец, Максвелл включает в систему уравнений еще «уравнение непрерывности» для случая, когда среда проводит электрический ток:

$$\text{div } \delta_{np} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (9)$$

Заметим здесь, что последнее уравнение является следствием уравнений (3), (5) и (8).

К этой системе уравнений Максвелл добавляет выражение для энергии электромагнитного поля

$$W = \int_V \left(\frac{BH}{2} + \frac{ED}{2} \right) dV.$$

Весьма существенным, характеризующим основную концепцию Максвелла о материальности электромагнитного поля, является его утверждение о локализации энергии в поле. Максвелл пишет: «Согласно старым теориям она находится в наэлектризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества, называемого потенциальной энергией или способностью производить определенные действия на расстоянии. По нашей теории она находится в электромагнитном поле, в пространстве, окружающем наэлектризованные и намагниченные тела, а также и в самых этих телах и проявляется в двух различных формах, которые могут быть описаны без гипотез как магнитная поляризация и электрическая поляризация, или согласно весьма вероятной гипотезе как движение и напряжение одной и той же среды». В этой же работе Максвелл дает методы расчета механических сил, действующих на проводники с токами, магниты и наэлектризованные тела, методы расчета коэффициентов электромагнитной индукции и теорию конденсаторов.

По своему значению особое место в этой работе занимает математическая разработка электромагнитной теории света. Решая систему уравнений электромагнитного поля для случая плоской волны, Максвелл показывает, что векторы напряженностей электрического и магнитного полей лежат в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения волны, т. е., что колебания в электромагнитной волне являются поперечными. Решая эту систему уравнений, Максвелл получает выражение для скорости распространения волны $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ (в современных обозначениях). Сопоставление рассчитанной по этой формуле скорости на основе упомянутых выше опытов Вебера и Кольрауша с имевшимися к тому времени результатами измерений скорости света приводит Максвелла к замечательному высказыванию: «Совпадение результатов, повидимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлениями свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма» (разрядка наша — *H.* и *P.*). Так, идея о единстве природы света и электромагнитных волн, содержащаяся в начальной форме уже в известных высказываниях М. В. Ломоносова, была убедительно закреплена физикой XIX века, в чем огромная заслуга принадлежит Максвеллу. Создание Максвеллом электромагнитной теории све-

та относится к числу крупнейших достижений науки.

Работа «Динамическая теория электромагнитного поля» по существу явилась основанием, на котором Максвеллом было построено великое здание его учения об электромагнитных явлениях в «Трактате об электричестве и магнетизме» [Л. 2]. Трактат является фундаментальным обобщением всего того, что было сделано до Максвелла и также им самим в области этого учения. Этот труд имел исключительное значение для быстрого развития и решения теоретических проблем и стремительного роста практических приложений в области электротехники. Основные задачи в трактате Максвеллом не только ставятся и формулируются в общем виде, но их решения доводятся во многих случаях до такой степени, что они могут быть непосредственно использованы для технических расчетов. Максвелл особое внимание уделял соответствию экспериментальных данных и математических соотношений; поэтому весьма важной задачей он считал не только правильный расчет, но и правильное измерение.

В трактате наряду с обобщением и развитием предыдущих работ Максвелл дал ряд новых блестящих разработок, содержащих новые глубокие идеи. Примером может служить исключительное по изяществу и общности рассмотрение Максвеллом явлений в электродинамических системах, образованных совокупностью контуров с электрическими токами. Максвелл весьма удачно применил к таким системам уравнения Лагранжа во второй форме, рассматривая в качестве обобщенных координат системы не только геометрические координаты, но и количества электричества, протекающие сквозь поперечные сечения проводников контуров от некоторого начального момента времени. Обобщенными скоростями при этом являются скорости изменения геометрических координат и электрические токи, а обобщенными силами — механические силы, действующие на контуры, и электродвижущие силы в контурах.

Большая общность связей, выраженных уравнениями Лагранжа во второй форме, привела Максвелла к замечательной мысли о возможности проявления в системе контуров с электрическими токами сил особого рода, обязанных существованию кинетической энергии, определяемой движением как самих контуров, так и токами в них. Общую кинетическую энергию системы Максвелл делит на три части:

$$T = T_m + T_e + T_{me},$$

где T_m — пондерокинетическая энергия, определяемая движением контуров;

T_e — электрокинетическая энергия, определяемая токами в контурах, т. е. энергия магнитного поля;

T_{me} — так называемая пондероэлектрокинетическая энергия, определяемая произведениями геометрических скоростей на электрические токи.

Максвелл сделал попытку обнаружить на опыте механические силы и электродвижущие си-

лы, зависящие от пондероэлектродинамической энергии, однако опыты его не дали положительных результатов. Аналогичные опыты были с успехом воспроизведены несколько в ином виде в последующее время рядом исследователей: Р. А. Колли, А. Эйнштейном и В. де-Гаазом, С. Барнеттом, Р. Толменом. Эти экспериментальные исследования имели большое принципиальное значение, так как они устанавливали инерционные свойства электронов в металлах и природе элементарных носителей магнитных свойств ферромагнитных тел.

Венцом замечательного труда Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме» является вывод уравнений электромагнитного поля, исследование распространения электромагнитных волн и электромагнитная теория света, разработанные в существенной части уже в предыдущих трудах Максвелла.

Общие физические представления Максвелла наиболее четко сформулированы в его брошюре «Материя и движение» [Л. 3]. В ней содержится толкование многих важных понятий. Указывая на ошибку Декарта и Спинозы, заключающуюся в том, что по их представлению пространство «есть единственная форма вещества, а все существующие предметы суть только проявления пространства», Максвелл сам отрывает понятия пространства и времени от материальной системы. Он говорит: «Мы считаем более способствующим научному прогрессу признать, вместе с Ньютоном, идеи времени и пространства отличными, по крайней мере в нашем воображении, от понятия о материальной системе, для выражения свойств которой и служат эти идеи», однако, отмечая, что «Все наше знание как о времени, так и о пространстве по существу относительно».

Высказывая некоторые мысли о всемирном тяготении, Максвелл пишет: «Но до сих пор является крайне сомнительным, представляет ли собою среда света и электричества некоторую тяготеющую субстанцию, хотя она на верное материальна и обладает массой» (разрядка наша — *Н.* и *Р.*). Последнее утверждение Максвелла отвечает современным представлениям о том, что фотоны и вообще электромагнитное поле представляют собой особый вид материи и обладают массой, в соответствии с универсальным законом взаимосвязи массы и энергии: $mc^2 = W$.

Максвелл придавал особое значение закону сохранения и превращения энергии. Он считал важнейшим условием передачи энергии участие промежуточной среды. «Энергия не может существовать иначе, как в связи с материей», — говорит Максвелл. «Рассмотрение различных форм энергии — энергии тяготения, электромагнитной, молекулярной, тепловой и т. д. — вместе с условиями превращения энергии из одной формы в другую и непременно существующего рассеяния энергии, полезной для производства работы, составляет содержание всей совокупности физических наук, поскольку они развились в динамической форме под различными названиями астрономии, электричества, магнетиз-

ма, оптики, теории физических состояний тел, термодинамики и химии». Такое высказывание имело важное значение для физики того периода, когда обращали внимание только на одну сторону закона сохранения и превращения энергии, что было отмечено Ф. Энгельсом в предисловии ко 2 изд. Анти-Дюринга (Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1953, стр. 13).

Развитие и применение закона сохранения и превращения энергии способствовали победе материализма над идеалистическими воззрениями по всему фронту естествознания. В этой борьбе Максвелл как проницательный исследователь природы оказался (по сути дела) на стороне материализма, что было отмечено В. И. Лениным («Материализм и эмпириокритицизм», Соч., изд. 4, т. 14, стр. 251, 252).

Учение Максвелла об электромагнитных явлениях не сразу получило полное признание и широкое распространение. Благодарную почву для своего развития оно нашло в России. А. Г. Столетов и К. А. Рачинский в период 1862—1863 гг. занимались опытами по исследованию влияния диэлектрической среды на электромагнитные явления. А. Г. Столетов особенно интересовался экспериментальным определением отношения электромагнитной и электростатической единиц электрического заряда. Первые свои опыты в этой области он произвел в 1876 г. Экспериментальное определение диэлектрических постоянных для различных изолирующих веществ, проведенное в 1874 г. Н. Н. Шиллером, имело решающее значение для обоснования теории Максвелла. В своей предсмертной работе «Элементарный трактат об электричестве» [Л. 5] Максвелл приводит результаты экспериментальных исследований Н. Н. Шиллера, а также важные данные, полученные русским ученым П. А. Зилковым, о диэлектрической проницаемости жидкостей. В своей диссертации на тему: «Электромагнитные свойства концов разомкнутых токов и диэлектриков» Н. Н. Шиллер экспериментальным путем доказывает несостоятельность концепции Ампера и Гельмгольца и справедливость утверждения Максвелла о наличии электрического смещения.

Среди экспериментальных работ русских ученых, посвященных вопросам теории Максвелла, особо следует отметить блестящие работы П. Н. Лебедева по исследованию прохождения коротких электромагнитных волн сквозь кристаллические тела и по исследованию давления света на твердые и газообразные тела и работу Р. А. Колли: «О существовании пондероэлектродинамической части энергии электромагнитного поля», приведшей к установлению инерции заряженных частиц в проводниках.

В организованной при Московском университете лаборатории имени Максвелла был выполнен ряд теоретических и экспериментальных работ, связанных с дальнейшим развитием теории Максвелла. В. К. Аркадьев, в течение многих лет руководивший этой лабораторией, ввел ряд новых понятий, которые существенно расширили круг вопросов, охватываемый этой теорией; в ча-

стности, им введено важное понятие комплексной магнитной проницаемости. В этой же лаборатории впервые А. А. Глаголевой-Аркадьевой были экспериментально получены электромагнитные волны весьма малой длины.

Для упрочения идей Максвелла огромное значение имела популяризация его теории. С изложением основ учения Максвелла в России выступали И. И. Боргман, Н. А. Умов, А. Г. Столетов, Д. А. Гольдгаммер и др. Широкому ознакомлению с идеями Максвелла способствовали труды В. Ф. Миткевича.

На западе учение Максвелла было воспринято не сразу. По выражению Л. Больцмана оно было «книгой за семью печатями». Л. Больцман был одним из основных популяризаторов идей Максвелла [Л. 7]. Он приложил немалые усилия к распространению трудов Максвелла и при этом придавал большое значение его ранним произведениям.

Одним из крупных физиков, поднявших значение теории Максвелла до той высоты, которую она заслуживает, был Генрих Герц. Герц говорил о Максвелле: «Он так обобщил электрические формулы, чтобы они включали в себя все известные явления; но наряду с ними они охватили и неизвестный класс явлений — электрические волны». Герц являлся ярким поборником теории Максвелла, продолжателем его дела. Если теория Максвелла предсказывала существование электромагнитных волн, то Герц экспериментально открыл электромагнитные волны и исследовал их свойства. В своем публичном выступлении Герц говорил: «Связь между светом и электричеством, которую теория предчувствовала, предугадывала, предвидела, установлена — установлена вразумительно и понятно для здравого смысла. С наивысшей точки, которой мы достигли, с высоты самого перевала нам открывается более широкий вид на обе области. Они оказываются большими, чем мы думали раньше» [Л. 8].

Действительно, дальнейшие успехи науки в этой области создали необозримые новые возможности для человеческой практики. Выдающийся русский ученый и изобретатель радио А. С. Попов, впервые использовал электромагнитные волны для практического осуществления радиосвязи и положил начало триумфальному развитию радиотехники в последующие годы.

Научный кругозор Максвелла был исключительно широк. Его перу принадлежит свыше 90 опубликованных работ. Среди них, помимо трудов в области электромагнитных явлений, имеются обширные труды в области кинетической теории газов, а также работы по теории цветов, о равновесии тел и т. д. Наконец, следует отметить деятельность Максвелла в области популяризации науки. В этом отношении блестящими примерами могут служить две его по-

пулярные брошюры, пронизанные научным творчеством автора: «Теория теплоты» и «Элементарный трактат об электричестве». Максвелл написал ряд статей для британской энциклопедии.

Максвелл — один из крупнейших ученых с мировым именем — внес своими трудами большой вклад в дело прогресса науки и техники.

Н. А. Умов в актовой речи, посвященной памяти Максвелла [Л. 9], говорил: «Задача науки не ограничивается открытием новых явлений и новых сил. Наука устанавливает связь между явлениями, стоящими особняком друг от друга, сводя их к некоторому общему принципу или закону; или же силою своих методов, этим шестым чувством человека, открывает в природе процессы, недоступные нашему непосредственному ощущению. Хотя работа мысли в этих направлениях и не скоро приводит к практически полезным результатам, но ее влияние на всю область человеческого мышления может быть настолько могущественным, что имя мыслителя становится гордостью и украшением человечества».

Можно без преувеличения сказать, что вся современная электротехника в значительной мере имеет свои истоки в классических трудах Максвелла.

Теория поля, в разработку которой Максвелл внес огромный вклад, в последующем своем развитии привела к новым важнейшим разделам современной теоретической физики — теории относительности и квантовой теории.

Литература

1. The Scientific papers of James Clerk Maxwell. т. I, II. Cambridge. 1890.
2. J. C. Maxwell. Treatise on Electricity and Magnetism. т. I, II. 1873.
3. J. C. Maxwell. Matter and Motion. London, 1876. Материя и движение. Пер. под ред. Н. Н. Андреева, 1924, Москва.
4. J. C. Maxwell. Elementary treatise on electricity. London, 1881. Электричество в элементарной обработке Клерка Максвелла, пер. под ред. М. П. Авенариуса, Киев, 1886.
5. Д. К. Максвелл. Речи и статьи. Перевод под редакцией акад. В. Ф. Миткевича. Гостехиздат, 1940.
6. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. Под ред. П. С. Кудрявцева. Тех. теор. издат., 1954.
7. L. Boltzmann. Vorlesungen über Maxwell's Theorie, т. I, II. Leipzig, 1891—1893.
8. H. Herz. Gesammelte Werke. Leipzig, 1914.
9. Н. А. Умов. Памяти Кларка Максвелла. Одесса, 1888.
10. L. Campbell and Garnett. The Life of James Clerk Maxwell, his correspondence and writings. London, 1881, 1884.

*Член-корр. АН СССР, проф. Л. Р. НЕЙМАН
Кандидат техн. наук Г. Р. РАХИМОВ*

*Кафедра теоретических основ электротехники
Ленинградского политехнического института
им. Калинина*

