УДК 621(091)

В. И. Винокуров

«ТРАКТАТ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ И МАГНЕТИЗМЕ» Д. К. МАКСВЕЛЛА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СОВРЕМЕННУЮ НАУКУ[1]

Рассматривается роль в развитии науки и техники теории электромагнитного поля, созданной Д. К. Максвеллом. Отмечается, что в основе квантовой теории, теории относительности и других лежат труды Максвелла. Показано огромное влияние на технические науки исследования электромагнитного поля, которое привело к появлению совершенно новых направлений в науке и технике.

Д. К. Максвелл, М. Планк, А. С. Попов, теория электромагнитного поля, физика, радио

Начертан этот знак не Бога ли рукою...
Л. Больцман
...Уравнения Максвелла стоят значительно больше, чем французская революция.
Р. Тейлор

Д. К. Максвелл (1831–1879)

В 1873 г. английский ученый Д. К. Максвелл опубликовал математическую теорию электрических и магнитных явлений, существовавшую ранее как совокупность отдельных экспериментальных положений (законов) и частных теорий. Из обобщенной теории, основу которой составили уравнения, носящие его имя, вытекало существование в природе электромагнитного поля – новой формы существования и движения материи. «Трактат» Максвелла оказал огромное влияние на развитие физики и техники. Корни важнейших современных физических теорий – теории относительности и квантовой механики лежат в теории электромагнитного поля Максвелла [1].

Сегодня теория Максвелла работает в радиоэлектронике, рентгенотехнике, информационных технологиях. Пожалуй, трудно назвать

[1] Статья была подготовлена проф. В. И. Винокуровым к 125-летию выхода в свет «Трактата» и опубликована в ограниченном тираже журнала «Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"» (2000. №2) в серии «История науки, образования и техники». В 2013 г. исполняется 140 лет со дня выхода «Трактата» и 90 лет со дня рождения заслуженного профессора СПбГЭТУ В. И. Винокурова. Статья подготовлена к печати руководителем музейного комплекса СПбГЭТУ канд. техн. наук Л. И. Золотинкиной.

отрасль техники, в основе которой не лежала бы теория электромагнитного поля: более того, развитие и техническое использование ее до сих пор не исчерпано.

Когда говорят об удивительном в науке, обычно приводят пример французского астронома У. Леверье, который по наблюдаемым возмущениям движения планеты Уран вычислил орбиту и местоположение в пространстве планеты Нептун, впоследствии действительно обнаруженной астрономом Галле. Это открытие, сделанное «на кончике пера», Леверье совершил с помощью расчетов на основе модели (законах) тяготения И. Ньютона, справедливость которой ранее была многократно подтверждена экспериментально.

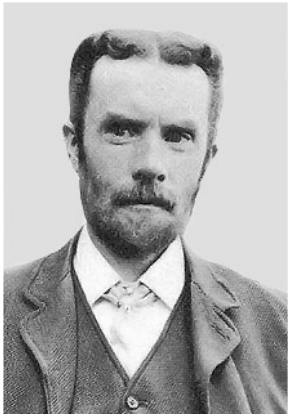
Так и Д. К. Максвелл «на кончике пера» предсказал (открыл) электромагнитное поле – новую форму существования и движения материи, причем сделал это на основе математической модели электрических и магнитных явлений, которую сам же создал и опубликовал в «Трактате...».

Р. Г. Герц
(1857–1894)

Изложение теории Максвелла в электротехнических журналах появилось впервые в середине 80-х гг. XIX в., но трактовалась она как «оригинальная гипотеза». И только в 1895 г., в год изобретения радио, в рецензии на книгу проф. И. И. Боргмана «Основание учения об электрических и магнитных явлениях» в журнале «Электричество», – одном из старейших в этой отрасли, отмечалось: «...только теперь она (теория Максвелла) получает полное признание и утверждается на место прежних теорий...».

Действительно, современники-ученые не сразу восприняли идеи и выводы Максвелла как отражение физической реальности. Они рассматривались как некоторые чисто математические представления и упражнения. Окончательно справедливость и физическая сущность теории Максвелла была блестяще подтверждена в Германии опытами Г. Р. Герца, который впервые получил и проделал с электромагнитными волнами все основные эксперименты, выявляющие волновую природу света. Результаты исследований Герц изложил в статье «О лучах электрической силы» в 1888 г.

Второе важное доказательство справедливости теории Максвелла – измерение светового давления – было выполнено в России несколько позже проф. Н. П. Лебедевым (1895).



О. Хэвисайд
(1850–1925)

Далее, в течение трех лет (1881–1884) Г. Герц и О. Хэвисайд придали уравнениям Максвелла более удобную, симметричную форму. Применение векторного исчисления привело к существенному упрощению записи уравнений и пониманию их сущности. Заметим, что в период написания «Трактата» векторное исчисление как самостоятельное направление математики еще не было сформировано, оно было частью теории кватернионов, основанной на представлении комплексных чисел. Д. Максвелл в своих работах частично рассматривал теорию кватернионов, особенно ее векторную часть. Именно в ней он увидел математический аппарат исследований и тот язык, на котором должна излагаться теория электри-

чества и магнетизма. Однако как самостоятельная область математики векторное исчисление было сформировано позже Д. Гиббсом и О. Хэвисайдом, которые в своих изысканиях исходили из работ Максвелла. Векторное исчисление действительно стало мощным аппаратом физических исследований, особенно в электродинамике.

Уравнения Максвелла были написаны как для потенциалов, так и для напряженностей, но именно потенциалы он считал основными величинами. В конце 80-х – начале 90-х гг. XIX в. Г. Герц и О. Хэвисайд своими работами положили начало применению напряженностей как основных характеристик поля. Потенциалы стали рассматривать как удобный способ математического описания волновых явлений. Во второй половине XX в. физики вновь возвратятся к потенциалам как важной характеристике поля.

В 1894 г. появились индикаторы электромагнитного поля в виде когереров О. Лоджа. Строились они на основе радиокондукторов Э. Бранли (1890), сопротивление которых резко падало после воздействия на них электромагнитного излучения.

А. С. Попов (1859–1906)

А. С. Попов ввел систему автоматического восстановления чувствительности когерера Э. Бранли, управляемую принимаемыми сигналами. Таким образом, А. С. Попов создал первый приемник беспроволочного телеграфа (1895), что в сочетании с осциллятором (передатчиком) Г. Герца означало создание системы беспроволочной связи, получившей позже наименование радиосвязи. А. С. Попов с помощью своего приемника, предназначенного для беспроволочного телеграфа, тогда же начал исследование характеристик электромагнитных волн естественного происхождения – грозовых разрядов [4]. Это стало началом исследования важнейшей проблемы радиотехники – помехоустойчивости. В последующем именно эти исследования стали основой нового научного направления – радиоастрономии.

Многообразие применений радио расширялось со временем. В начале 1930-х гг. началось исследование его применения для целей дистанционного обнаружения объектов, принципиальную возможность которого впервые наблюдал А. С. Попов еще в 1897 г. Завершилось исследование созданием в различных странах нового направления радиотехники – радиолокации. Появились и другие применения радио: радионавигация, управление, спектроскопия, радиометеорология и др. Естественно, что каждое из направлений радиотехники требовало новых исследований электромагнитного поля.

Первый толчок таким исследованиям дали смелые опыты Г. Маркони еще в 1901 г. Это была беспроволочная связь через Атлантический океан, выполненная с помощью «приема на слух», предложенного А. С. Поповым в 1899 г. Опыты г. Маркони положили начало активным исследованиям в области распространения, а затем и рассеяния электромагнитных волн, которые сопровождали всякое новое применение радио и освоение новых диапазонов частот. Современному человеку кажется, что радио существовало всегда, но в действительности его корни идут от «Трактата» Д. Максвелла.

Соображения по техническому использованию электромагнитных волн, и прежде всего для связи, появились сразу же после опытов Г. Герца. Их высказывали ученые разных стран: О. Д. Хвольсон (Россия, 1890), А. С. Попов (Россия, 1891), В. Крукс (Англия, 1892), Н. Тесла (США, 1893) И. Томпсон (США, 1899) и др.

В 1895 г. произошло еще одно важное открытие, базировавшееся на основах «Трактата» Максвелла: К. Рентген открыл Х-лучи, обладающие высокой проникающей способностью и позволяющие исследовать внутреннее строение материалов и изделий. Позже было доказано, что Х-лучи – это электромагнитные волны, длина которых значительно меньше, чем ультрафиолетовых.

Всеобъемлющее влияние теории Максвелла проявилось сразу же после опытов Герца. По представлениям того времени электромагнитные волны распространялись в эфире, где движется Земля, а наблюдается движение этих волн относительно Земли. Поэтому скорость света, представляющего по теории Максвелла также электромагнитную волну, должна в соответствии с законами механики иметь разное значение в различных направлениях на Земле. Правда, теория Максвелла не требовала понятия эфира, но физики продолжали пользоваться этой концепцией, лежащей в основе понимания явлений природы в тот период и обладающей наглядностью в свете представлений механики.

Незадолго до смерти в письме астроному Тодду Максвелл указывал на принципиальную возможность экспериментального определения движения Земли относительно эфира, для чего предлагалось измерить в земных условиях скорость света между двумя точками в одном, а затем в противоположном направлении. Чувствительность прибора при этом должна определяться отношением $\sqrt{\upsilon/c}$, где υ – скорость движения прибора относительно эфира (эфир полагался неувлекаемым). Такую чувствительность Максвелл считал пока недостижимой. Но человеческая мысль быстро меняет границу между недостижимым и доступным. Письмо Максвелла было опубликовано в 1880 г., а уже в 1881 г. молодой американский ученый А. Майкельсон производил опыты с прибором, позволяющим обеспечить указанную чувствительность. В последующем чувствительность прибора потребовалось повысить, и это также осуществил Майкельсон. Его исследования по измерению скорости света в разных направлениях в земных условиях, стоящие на стыке электродинамики и механики, привели к сенсационному результату: изменения скорости не наблюдались.

Стремясь разобраться в сущности этого «феномена», ученые начали изучать распространение электромагнитных волн в движущихся средах, пользуясь моделью электронного строения материи. Рассмотрение привело к введению новых необычных допущений, близких к релятивистским моделям. В этой связи нельзя не отметить усилия и успехи таких крупных ученых, как Д. Фицджеральд, Х. Лоренц, Д. Лармор, А. Пуанкаре и других, работавших в указанном направлении в различных странах. Позднее, обобщая и развивая эти исследования, А. Эйнштейн в 1905 г. сформулировал принцип (фундаментальный физический закон) и теорию относительности (первоначально частную, а затем общую), отражающую общий закон природы и устанавливающую особенности движения тел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, при воздействии полей тяготения [2]. Одно из основных положений теории относительности – постоянство скорости света в вакууме и ее независимость от скорости движения источника. Значимость этого открытия трудно

переоценить, а его истоки снова относятся к теории Д. Максвелла. Заметим, что теорию относительности, как и теорию Максвелла, современники встретили с недоверием, а неизменность скорости света в вакууме вызывала большие сомнения. Попытки проверить это положение и уточнить значение самой скорости продолжались и во второй половине XX в. с помощью современных квантовых приборов.

В начале XX в. выделились две группы явлений, требующие особого изучения: взаимодействие электромагнитных волн с веществом и понимание процессов, происходящих в атоме. Относительно первой группы явлений речь шла в основном о распределении по частоте энергии электромагнитных волн, излучаемых нагретым телом в равновесном состоянии при различных температурах последнего. Эту задачу строго решил немецкий ученый М. Планк, используя в значительной степени результаты и положения теории Максвелла [3].

Постановка задачи, решаемой Планком, требовала установления связи между электродинамическими и термодинамическими характеристиками, а решение – согласования основных положений электродинамики и термодинамики, которые исторически развивались независимо друг от друга. Планк приписывал термодинамические характеристики (температуру и энтропию) не только нагретым телам, но и излучению, что подтверждалось процессом установления теплового равновесия. Процессы излучения и поглощения он рассматривал как электромагнитные, поэтому в качестве источников и поглотителей излучения (модель черного тела) выбрал гармонические осцилляторы, которые, как он отмечал, «можно полагать находящимися в какой-то взаимосвязи с ...атомами излучающих тел». Осцилляторы – в конечном счете модели атомов, описываемых электродинамически. Излучение характеризовалось не только энергией и длиной волны (измеримые параметры), как принято в термодинамике, но также амплитудой и фазой колебаний (неизмеряемые параметры), т. е. электродинамические.

Планк ввел понятие интенсивности излучения на определенной частоте, а также гипотезу «естественного излучения» – допущение полной нерегулярности распределения по колебаниям амплитуд и фаз энергий, входящих в состав излучения на определенной частоте. Введение этой гипотезы позволяло Планку применять усреднение по неизмеряемым электромагнитным параметрам и переходить к измеряемым термодинамическим характеристикам. Введение нерегулярности в электромагнитные явления устранило противоречие между регулярностью процессов, определяемых уравнениями Максвелла, и статистическим характером процессов передачи тепла с помощью излучения. В результате Планк получил в виде уравнения электродинамическую модель системы, состоящей из осцилляторов и излучения, связывающего интенсивность полного излучения с энергией осциллятора для определенной частоты. С помощью этого уравнения стало возможным вместо исследования характеристик излучения системы исследовать поведение осциллятора.

Важным шагом в исследовании Планка было построение алгоритма, с помощью которого, зная выражение для энтропии осциллятора, можно вычислить функцию распределения излучения по длинам волн. В результате на первом этапе была получена формула распределения, подтвердившая зависимость, найденную ранее Вином. Но, в отличие от последнего, выводы и посылки Планка лежали строго в рамках положений теории Максвелла и термодинамики. Существенную роль в выводах играло изменение энтропии осциллятора, мерой которой является вторая производная от энтропии по энергии. Эта вводная была исходным моментом в конечном алгоритме вывода распределения.

Новые экспериментальные данные о распределении энергии для диапазона длинных волн, согласно которым интенсивность излучения линейно зависит от температуры, заставили Планка пересмотреть свою систему анализа. Его целью стало получение такой формулы распределения, которая соответствовала бы всем возможным тогда экспериментам и была бы наиболее простой. По результатам экспериментальных измерений Планк уже знал характер этой зависимости как в области малых длин волн (закон Вина), так и в области длинных волн. В итоге был сформулирован закон распределения энергии излучения по длинам волн, носящий имя великого физика.

Весьма важным было то обстоятельство, что соответствие кривой распределения (найденной Планком теоретически) полученным ранее экспериментальным зависимостям имело место при введении допущения, что электромагнитное излучение испускается и поглощается осцилляторами не непрерывно, как это следовало из классических представлений, а дискретными порциями – квантами. Это был первый шаг в истории становления квантовой теории, тесно связанной с теорией электромагнитного поля Максвелла.

В 1905 г. А. Эйнштейн высказал предположение, что свет не только испускается и поглощается дискретными порциями, но и распространяется также дискретными порциями, т. е. свету присуща квантовая природа. На новом качественном уровне произошло практически возрождение идей И. Ньютона, развивавшего в начале XVIII в. корпускулярную теорию света и предложившего гипотезу, сочетавшую корпускулярные и волновые представления. В результате работ М. Планка и А. Эйнштейна произошло значительное сближение сущности двух важнейших объектов природы – частиц и полей. Гениальная догадка Планка (1900) стала началом квантовой механики, определяющей «странные» и «противоречащие здравому смыслу» закономерности движения частиц с весьма малой массой. Квантовые представления проникли в различные области физики и химии, стали достоянием ряда технических наук. Получила развитие квантовая электродинамика – квантовая теория взаимодействия электромагнитных полей и заряженных частиц. Квантовая механика ныне – одна из всеобъемлющих физических теорий, а корни ее тянутся к «Трактату» Д. Максвелла. Заметим, что у квантовой механики, как и у теории относительности, на начальном этапе также было много противников, в их числе был и М. Планк.

В последующем теория относительности и квантовая механика сыграли огромную роль в формировании моделей строения вещества и объяснении процессов, протекающих в микромире. Именно они явились важной вехой на пути овладения ядерной энергией.

Рассмотренные примеры при всей их значимости не охватывают многообразия влияния «Трактата» Максвелла на современную науку. Так в середине XX в. шведский ученый А. Ханнес развил концепцию электромагнитных полей в космическом пространстве и их влияния на движение заряженных частиц, заложив тем самым основы нового направления в науке – космической электродинамики. Теория электромагнитного поля сыграла важную роль и в биологии, отразив многообразие и сложность электромагнитных явлений, протекающих в живых организмах, и определив ряд существенных процессов, протекающих в биосфере.

Электромагнитные волны техногенного происхождения в земных условиях имеют высокую интенсивность и весьма широкий диапазон частот. Они не всегда безвредны для человека и живых организмов, хотя во многих случаях можно отметить их благотворное

лечебное воздействие. Поэтому естественным представляется возникновение нового научно-технического направления – электромагнитной экологии.

Первой исследуемой характеристикой электромагнитных волн естественного происхождения была частота грозовых разрядов и создаваемые этими разрядами помехи радиоприему. В начале 1930-х гг. в США К. Янеки, исследуя атмосферные помехи, обнаружил радиоизлучение, приходящее на Землю из центра Галактики. На публикацию Янеки научная общественность первоначально не обратила внимания, но зарождение радиоастрономии произошло, так как у первого исследователя появились последователи. Активное развитие нового направления естествознания началось после второй мировой войны. За сравнительно короткое время были открыты разные виды космических радиоизлучений: тепловое, расположенное в сплошном спектре частот, дискретное по частоте излучение межзвездного водорода и линии спектра молекулярного происхождения, индуцированное излучение возбужденного вещества. Обнаружены и оригинальные «излучатели», имеющие специфические свойства, в том числе характеризуемые высокой интенсивностью радиоизлучения, малыми угловыми размерами, периодическим изменением интенсивности излучения во времени и др. Благодаря изучению радиоизлучения, в астрономии были открыты новые объекты: квазары, пульсары, черные дыры, белые карлики и др. Что особенно важно, появились новые модели процессов и физических явлений. Большая «продуктивность» применения радиоволн для астрономических исследований состоит не только в расширении используемого диапазона частот, но еще и в том, что эти волны мало поглощаются космической пылью. Таким образом, имеет место сравнительно редкий случай, когда естественная наука – радиоастрономия – зародилась на основе технической науки – радиотехники – детища, открытого Максвеллом «на кончике пера» электромагнитного поля.

До сих пор учение Максвелла об электромагнитном поле составляет важную часть современного высшего образования, хотя и не сразу стало достоянием учащейся молодежи. Первичная математическая модель Максвелла была представлена в форме интегральных уравнений, имела сложный вид, была трудна как для изложения, так и для понимания. Более простую симметричную форму их записи предложили независимо друг от друга Г. Герц и О. Хэвисайд; широкое применение векторного исчисления способствовало упрощению вида уравнений, хотя модель Максвелла по-прежнему сохраняет оригинальность в кругах ученых-теоретиков.

В полном объеме в электротехнические дисциплины высших учебных заведений уравнения Максвелла были введены в конце 20 – начале 30-х гг. XX в. В России это произошло в 1930 г.: появились серьезные учебники и пособия, содержащие изложение теории Максвелла. К их числу следует отнести труды физика С. И. Покровского (конец 30-х гг.), в прошлом ассистента А. С. Попова в ЭТИ, и академика И. Е. Тамма (40-е гг.). Интересен опыт проф. Ю. Я. Юрова (начало 50-х гг.), объединившего в одной дисциплине изложение основ математического аппарата, теории поля, а также некоторых технических ее приложений, выполненных с помощью упрощающих допущений.

Изучение теории электромагнитного поля Максвелла в настоящее время является составной частью подготовки специалистов различных направлений науки и техники, в том числе инженеров.

Область применения электромагнитных полей расширяется, а их значимость в науке и технике постоянно растет. Но еще более существенным является то обстоятельство, что постепенно накапливаются факты, которые не укладываются в рамки модели классических уравнений Максвелла. К ним можно отнести проницаемость волн сквозь экраны (что по современным представлениям совершенно невозможно), наблюдаемое взаимодействие биообъектов, влияние космических процессов на земные процессы и др. Высказывается гипотеза, согласно которой уравнения Максвелла описывают не все явления, связанные с электромагнитным полем. Если это действительно так, то человечество ожидают новые открытия, о значимости и последствиях которых трудно даже фантазировать.

Вклад Максвелла в науку огромен, ведь идеи, изложенные в «Трактате», не единственные из его достижений. К крупнейшим достижениям следует отнести и формирование статистических представлений распределения молекул по скоростям, носящих его имя в динамической теории газов. Его исследования в этой области предопределили появление работ Л. Больцмана и Д. Гиббса. С именем Максвелла связано и введение в физику одной из двух фундаментальных постоянных – скорости света. Много сил отдал Максвелл воспитанию научной молодежи и педагогической деятельности.

Когда-то Г. Гельмгольц говорил: «Значимость личности определяется степенью ее влияния на окружающих». Трудно назвать человека, чьи идеи и труды повлияли и влияют на окружающих больше, чем идеи Д. К. Максвелла, входящие в «Трактат об электричестве и магнетизме», вышедший в свет 140 лет тому назад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максвелл Д. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М: Гостехтеоретиздат, 1952.
2. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. М.: Наука, 1965.
3. Планк М. Избранные труды. М.: Наука, 1975.
4. Попов А. Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний // Журн. Русского физико-химического общества. Ч. физическая. 1896. Т. 28, № 1. С. 92–96.

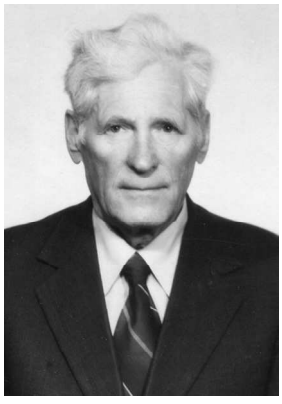
V. I. Vinokurov

«TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM» BY J. K. MAXWELL AND ITS INFLUENCE ON MODERN SCIENCE

The paper considers significance of the J. K. Maxwell electromagnetic field theory in the development of science and engineering. It is emphasized that Maxwell's research laid the foundation for quantum theory, relativity theory and other theories. It is shown that investigations of electromagnetic field produced a profound influence on technology and engineering fields of science, which gave rise to entirely new directions in science and engineering.

J. K. Maxwell, M. Plank, A. S. Popov, the electromagnetic field theory, physics, radio

Об авторе



Винокуров Виктор Иванович (1923–2003). Специалист в области радиолокации и проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, организатор инженерного образования. Окончил (1951) ЛЭТИ по специальности «Электрофизика». С 1951 г. – сотрудник ЛЭТИ, с 1957 г. – преподаватель, 1956 г. – канд. техн. наук, с 1968 г. – доктор техн. наук, в 1969 г. – профессор. Проректор по научной работе (1965–1970), декан (1974–1988) факультета корабельной электрорадиотехники и автоматизации (ФКЭА), организа-

тор и заведующий кафедрой радиооборудования кораблей ЛЭТИ (1970–1990). Создатель научно-педагогической школы морской радиолокации, электромагнитной совместимости и радиооборудования подвижных объектов. Научная деятельность В. И. Винокурова посвящена исследованиям и разработкам по созданию помехоустойчивых радиолокационных систем, применению в радиолокации сложных шумоподобных дискретно-кодированных сигналов, построению РЛС с использованием автоколебательных систем с задержанной обратной связью, вопросам радиофизики (распространение и рассеяние волн) и др. Автор более 200 научных работ, в т. ч. десяти монографий и учебных пособий. Руководил созданием базовых кафедр, подготовкой инженеров в системе повышения квалификации специалистов. Председатель научно-методического Совета по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии; участвовал в организации первых в России международных симпозиумов по этой проблеме. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1991), действительный член Международной академии наук высшей школы (1994). Участник Великой Отечественной войны: орден Отечественной войны I ст., медали «За оборону Ленинграда», «Партизану Великой Отечественной войны», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне», юбилейные медали. Заслуженный профессор СПбГЭТУ (2003).