

УДК 160.1

## ГЕНЕЗИС ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МАКСВЕЛЛА: ИНТЕРТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

*Р.М. Нугаев*

Генезис максвелловской электродинамики рассмотрен в свете предложенной автором модели смены теорий, апробированной на изучении коперниканской и эйнштейновской революций. Показано, что и в данном случае новая теория возникла на стыке домаксвелловских исследовательских программ. «Нейтральным языком» для сравнения выводов теорий из этих программ и для установления связей между ними явилась механика сплошных сред. Программа Максвелла не столько превзошла программу Ампера – Вебера, сколько ассимилировала ряд ее положений. В основу максвелловской стратегии синтеза легли идеи кантовской эпистемологии.

**Ключевые слова:** теория, научная программа, научная революция, модель, Максвелл, электродинамика

Принято считать, что максвелловская электродинамика явилась этапом развертывания основанной на концепции близкодействия фарадеевской научно-исследовательской программы. Последняя, обеспечив предсказание и опытное подтверждение существования электромагнитных волн, победила конкурировавшую с ней исследовательскую программу Ампера – Вебера, основанную на альтернативной представлению о близкодействии концепции дальнего действия. Но более пристальный взгляд на историю и методологию физики второй половины XIX в., ставший возможным прежде всего благодаря исследованиям Д. Сигела [1], М. Моррисон [2] и О. Дарриголя [3], позволяет поставить эту точку зрения под сомнение в силу следующих аргументов.

1. *Сам Максвелл неоднократно и до конца своих дней подчеркивал, что ключевые идеи электродинамики Ампера – Вебера не столько альтернативны, сколько дополнительны по отношению к концепции полевого взаимодействия.*

В начале своих исследований в области электродинамики, в мае 1855 г., юный Максвелл, аспирант Кембриджского университета, со-  
© Нугаев Р.М., 2014

общает отцу: «Я продолжаю работать над электричеством, стремясь проложить *свой* путь сквозь работы солидных (heavy) немецких авторов. Чтобы привести в порядок все *их* понятия, потребуется много времени, но я надеюсь выработать *свой* взгляд на этот предмет и прийти в конце концов к чему-то *интеллигибельному* (intelligible) в виде теории». А в конце жизненного пути в своем *opus magnus* – «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.) Максвелл вспоминает: «...Я отдавал себе отчет в том, что в то время полагали, что существует определенная разница между фарадеевским способом понимания явлений и способом понимания математиков, так что ни те, ни другой не были удовлетворены языками друг друга. Я был также убежден в том, что *эти расхождения не были результатом того, что одна из партий ошибалась*» [5].

2. *Основное экспериментальное подтверждение максвелловской электродинамики было получено не сотрудниками созданной самим Максвеллом и долгое время им руководимой прекрасно оборудованной Кавендишской лаборатории, не его британскими учениками и последователями, а учеником Г. Гельмгольца немецким физиком Г. Герцем (1888 г.), который сторонником теории Максвелла себя не считал* [6].

3. *Влияние идей Фарадея на Максвелла сильно преувеличено. Объяснение принятия полевой концепции симпатией к идее близкодействия анализом работ Максвелла не подтверждается* [7]. Относиться к полю как к физической реальности Максвелл начал довольно поздно: лишь *после* того, как вывел из своих уравнений существование магнитных (электромагнитных) волн, т.е. *после* введения понятия тока смещения. До этого представление о поле он использовал с «откровенно иллюстративной» целью – для построения наглядных образов сложных векторных дифференциальных уравнений [8].

Переход к дифференциальным уравнениям в частных производных, составлявший содержание статьи 1856 г. [9], отнюдь не состоял в переходе к представлению о физическом близкодействии. Уравнение Пуассона для потенциала тяготения, например, известное и Максвеллу, и его современникам, никто и не собирался интерпретировать в духе полевой концепции.

Далее, специфические черты фарадеевского понятия поля состоят в том, что сила – это субстанция, причем субстанция единственная, и что все силы способны к взаимопревращениям посредством различных движений силовых линий [10]. Но Максвелл, пытаясь найти математическое выражение непрерывных преобразований электрических

и магнитных сил, рассматривал последние как стрессы и натяжения в механическом эфире [11].

Цель настоящей работы – более полно раскрыть интертеоретический контекст максвелловской революции и предложить такую ее рациональную реконструкцию, которая учитывает приведенные выше три аргумента. Максвелловская революция представляет собой гораздо более сложное явление, чем это может показаться с точки зрения ряда известных моделей научных революций [12]. Ранее мною уже отмечалось, что среди основных недостатков этих моделей отсутствие описания процесса взаимодействия «парадигм», «научно-исследовательских программ», «исследовательских традиций» и т.д. [13]. И одна из задач данной работы – показать, что это замечание особенно справедливо по отношению к генезису максвелловской электродинамики. Программа Максвелла не только в конечном счете превзошла программу Ампера – Вебера, но и успешно ассимилировала ряд положений ее твердого ядра, соединив их с рядом идей Фарадея и положений оптики Юнга и Френеля.

Основной недостаток работ Д. Сигела, М. Моррисон и О. Дарригола состоит в недооценке значения *собственной методологии Максвелла*, разработанной им для своего проекта синтеза теорий электромагнетизма и оптики. Мне представляется, что следует более внимательно отнестись к замечаниям такого современника Максвелла, как Л. Больцман. Последний справедливо указывал, что многие произведения Максвелла, а особенно его ранние статьи по электродинамике, «не были достаточно поняты», возможно, потому, что эти работы, «написанные по хорошо обдуманному заранее плану», показывают, что их автор «*был столь же крупным творцом в теории познания, как и в области теоретической физики*» [14]. Методология Максвелла явилась не только самостоятельной, но и *необходимой* составляющей его творчества [15].

### **Особенности максвелловской методологии конструирования синтетической глобальной теории**

Зачем нужна была еще одна точка зрения на явления электричества и магнетизма? Уже в первой своей «электрической» работе Максвелл дает ответ: электродинамика Ампера – Вебера – слишком математизированная теория, игнорирующая связи *между статическим и динамическим электричеством* [16]. Максвелл не был первым, кто осуществил

синтез оптики и электромагнетизма, но его не устраивало, *как* был осуществлен и понимался синтез его предшественниками. Почему?

Этими предшественниками в создании теории электромагнетизма были Эрстед, Ампер, Вебер, Фарадей и Томсон. Но мировоззрение Максвелла резко отличается от их взглядов прежде всего несопоставимо более высоким уровнем философской культуры. Блестящему студенту Эдинбургского университета и выпускнику, а затем аспиранту Кембриджа, сыну преуспевающего юриста лорду Джеймсу Клерку Максвеллу был присущ глубокий скептицизм Юма, Беркли и Канта, впитанный им на лекциях по философии сознания, читавшихся в Эдинбургском университете сэром Уильямом Гамильтоном (1788–1856). Эти лекции, которые «интересовали его чрезвычайно», не только оказали на Максвелла «сильное впечатление», но и развили его «любовь к спекуляциям, к которым он в итоге оказался весьма склонен».

Именно Гамильтон с его сомнениями в возможностях познания сущности вещей привил Максвеллу вкус к кантовской философии. Подобно Канту Гамильтон полагал, что мы можем обладать достоверным знанием только об *«относительных проявлениях вещей»*, и именно наша глубочайшая мудрость состоит в признании того, что сами эти вещи находятся за пределами достижимости философии».

Это и отметил юный Максвелл в качестве четвертого пункта программы исследований, составленной при переезде из Эдинбурга в Кембридж: *«прочтение кантовской “Критики чистого разума” под углом согласования ее с сэром Уильямом Гамильтоном»*. Основные положения этой программы достаточно подробно излагаются в двух философских в своей основе работах Максвелла: в эссе «Об аналогиях», прочитанном на заседании кембриджского «Клуба Апостолов» в 1856 г. после публикации самой фундаментальной в мировоззренческом и методологическом отношениях статьи Максвелла «О фарадеевских линиях сил» [18], и в статье «Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц» [19].

Суть «коперниканской революции» Канта состояла в том, что *мир повседневного, обычного опыта* («жизненный мир», *lebenswelt*, как скажет впоследствии Э. Гуссерль) *утрачивал право быть исходной точкой отсчета в истолковании чувственно воспринимаемых вещей*. У Канта мир привычного опыта заменяется галилеевской экспериментально-математической физикой, в основе которой лежат идеализации, обусловленные абстрагированием от «жизненного мира». Поэтому истина уже не есть нечто непосредственное, само себя являющее и раскрывающее, но есть результат нахождения при помощи определенного метода.

Особое место в процессе познания занимают так называемые *аналогии опыта*. Они относятся не к «порождению созерцаний», а к *связи их существования в опыте*. «...Познание по аналогии... не означает, как обычно понимают это слово, несовершенного сходства двух вещей, а означает совершенное сходство двух отношений между совершенно несходными вещами» [20].

Более детально, в «Критике чистого разума», Кант рассматривает три аналогии опыта следующим образом: «...Если вещь находится в связи с некоторыми восприятиями согласно принципам их эмпирического связывания (согласно аналогиям [опыта]), то существование ее можно познать также и до восприятия ее, стало быть, до некоторой степени а priori. В этом случае существование вещи все же связано с нашими восприятиями в возможном опыте, и мы можем дойти от своих действительных восприятий до вещи через ряд возможных восприятий, руководствуясь упомянутыми аналогиями [опыта]. Так, воспринимая притягиваемые железные опилки, мы познаем существование проникающей все тела магнитной материи, хотя непосредственное восприятие этого вещества для нас из-за устройства наших органов невозможно» [21].

Даже пример работы принципов аналогии в научном познании Кант приводит из области магнитных явлений, как бы указывая дорогу Максвеллу. И эссе Максвелла «Существуют ли действительные аналогии в природе?», написанное в 1856 г., «вышло» из «Критики чистого разума».

Максвелл не дает определенного ответа на сформулированный в заголовке эссе, приводя аргументы как pro, так и contra – в полном соответствии с кантовскими антиномиями, которые, как известно, возникают при попытках разума выйти за пределы опыта. Философское разрешение антиномий, по Максвеллу, должно состоять в признании относительности всякого конкретного знания. Все, что нам остается, – это прибегать к аналогиям и моделям. «Когда видят отношение между двумя вещами, которые хорошо известны, и думают, что должно быть сходное отношение между вещами, которые менее известны, то заключают от одного к другому. Это предполагает, что несмотря на то что пары вещей могут значительно отличаться друг от друга, *отношение* в одной паре может быть тем же, что и в другой. Теперь с научной точки зрения *отношение* – это самое важное, что нужно знать, и знание об одной вещи позволяет в конечном счете получить знание о другой» [22]. Таков первый урок, извлеченный Максвеллом из кантовской философии, – «*принцип относительности научной истины*».

Но этим влияние Канта не ограничивается. В эссе утверждается еще один принцип – *«принцип активности теории по отношению к опыту»*. «Расплывчатые контуры феноменальных вещей сливаются друг с другом (merge into one another) до тех пор, пока мы не направим на них *фокусирующее стекло теории* и не сфокусируем его так, чтобы получить одну дефиницию, а иногда – другую, чтобы проникнуть в *разные глубины* великого жернова мира» [23].

Значение этого принципа для всего творчества Максвелла трудно переоценить. В природе все явления тесно взаимосвязаны и проникают друг в друга (merge into one another), и вся разница в теоретических подходах обусловлена тем, что их авторы фокусируются на разных сторонах и разных уровнях рассматриваемых явлений. Поэтому задача теоретика состоит прежде всего в том, чтобы ввести особые понятия, отражающие различные аспекты явлений. Откуда они берутся?

Еще один отрывок из письма Максвелла, написанного в 1854 г., позволяет более глубоко проникнуть в его творческую лабораторию: «Вытачивание (grinding out) “подходящих идей”, как их называет Уэвелл, – тяжелая работа. В конечном счете они все-таки появляются на свет божий, и после столкновения их с фактами и расхожими полупереверенными теориями я рассчитываю придать им определенную форму, после чего надеюсь узнать об индуктивной философии поболее, чем знаю сейчас» [24].

Вот откуда берутся понятия: они не пассивные копии вещей, а те формы (априорные), в которых расплавленная масса хаотических ощущений и впечатлений отливается, приобретая сначала смутные очертания. Но затем эти сырые формы еще и «обтачиваются» за счет столкновения их как с опытными данными, так и со следствиями из других теорий, для того чтобы они приобрели завершенность. Однако задача теоретика состоит не только в том, чтобы ввести и отполировать теоретические понятия, отражающие различные аспекты явлений, но также в том, чтобы соединить эти аспекты в синтезе. Каким же он должен быть?

Контуры и этапы такого синтеза намечены Максвеллом в статье «Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц». Примечательно, с чего она начинается: «Обычно научное знание растет за счет аккумуляции вокруг конечного числа отличающихся друг от друга центров. Но рано или поздно должно наступить такое время, когда два или более раздела знания уже не могут оставаться независимыми друг от друга, а должны *слиться в согласованное целое* (must be fused into a consistent whole). Но несмотря на то что ученые мужи могут быть глубоко убеждены в необ-

ходимости подобного слияния, сама эта операция является одной из *самых трудных*. Ведь хотя явления природы все согласованы друг с другом, мы должны иметь дело не только с ними, но и с гипотезами, которые были изобретены для систематизации этих явлений; и ниоткуда не следует, что из-за того, что одна группа наблюдателей установила со всей искренностью для их упорядочения одну группу явлений, гипотезы, которые они сформулировали, будут согласованы с теми, при помощи которых вторая группа наблюдателей объясняла другое множество явлений. Каждая наука может показаться достаточно (*tolerably*) согласованной внутри самой себя, но прежде чем науки смогут быть объединены в одно целое, каждая должна быть освобождена от «известкового раствора», при помощи которого ее части были предварительно скреплены для согласования друг с другом. Поэтому в операции слияния двух наук в одну в общем случае содержится много критики установленных методов и отбрасываются многие куски любимых знаний, которые ранее долгое время имели устойчивую научную репутацию» [25].

И в других работах Максвелл неоднократно подчеркивал ценность «*взаимооплодотворения* разными науками друг друга» [26]. Классический пример устранения «остатков цемента», который Максвелл приводил неоднократно, – это создание ньютоновской теории тяготения, когда «прогресс науки состоял в освобождении от небесных механизмов, которыми поколения астрономов загромождали небеса, в смывании паутины с неба» [27].

### Этапы реализации синтетической программы Максвелла

«Трактат об электричестве и магнетизме» был прежде всего энциклопедией и учебником. Все основные «электромагнитные» результаты были получены в следующих трех статьях Максвелла: «О фарадеевских силовых линиях» [28], «О физических силовых линиях» [29], «Динамическая теория электромагнитного поля» [30].

Статья «О фарадеевских силовых линиях» посвящена разработке, на основе кантовской эпистемологии, «метода физических аналогий». Последний состоит не в том, что предлагается еще один «онтологический» подход, отвергающий все предыдущие как основанные на ложных предпосылках и утверждающий, что «на самом деле» электричество и магнетизм – это поля, а не непосредственные взаимодействия зарядов, происходящие по прямым линиям. Максвелл предлагает рассматривать фарадеевские силовые линии, с помощью представлений о которых опи-

сывались направления электрических и магнитных сил, в качестве трубок с идеальной несжимаемой жидкостью.

Для кантианца принципиально важно, что эта несжимаемая жидкость практически *никакого отношения к реальности не имеет*. Единственное предъявляемое к предлагаемым моделям (как, впрочем, и ко всем математическим конструктам) требование – чтобы они не противоречили друг другу. Во всем остальном – полная свобода воображения. Даже законы сохранения могут в наших моделях нарушаться [31].

И в оставшихся разделах статьи «О фарадеевских силовых линиях» Максвелл показывает, каким образом идея линий движения жидкости может быть применена для синтеза таких относительно простых разделов физики, как статическое электричество, постоянный магнетизм, магнетизм индукции и однородные гальванические токи.

Суть предлагаемых им инноваций – конструирование *«нейтрального языка»* для описания наблюдений и сравнения выводов из различных конкурирующих схем и теорий. Этот язык – отнюдь не карнаповский «язык наблюдений». Максвелл отдает себе отчет в «теоретической нагруженности языка наблюдения», он понимает, что любое наблюдение всегда несет на себе «отпечатки» теоретического языка, при помощи которого оно описано («следы цемента»), как позже назовет их Максвелл в статье «Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц»).

Поэтому для того, чтобы сравнить между собой и свести воедино, в *непротиворечивую* теоретическую схему результаты экспериментов, несущих следы разных теоретических языков, необходимо создать искусственный теоретический язык, по возможности равноудаленный от всех сравниваемых теорий. Этот язык – механика сплошных сред. Конечная цель Максвелла – «переписать» все известные законы на этом языке, сравнить их выводы между собой, с тем чтобы избавиться от противоречий и обобщить, наконец, в самосогласованной системе уравнений.

Итог статьи «О фарадеевских силовых линиях» – вывод уравнений Максвелла, но без тока смещения. Не случайно серьезным недостатком модели трубок несжимаемой жидкости было то, что она, за исключением отдельных простых случаев, *была неспособна объяснить связи и взаимодействия электрических, магнитных полей и электрических токов*, а также продемонстрированную Фарадеем (в 1845 г.) *взаимосвязь магнитных и оптических явлений*. Ведь целью всей своей программы Максвелл поставил устранение присущей электродинамике Ампера – Вебера «разобщенности покоящегося и движущегося зарядов». Была ли эта цель



достигнута в 1856 г.? Нет. Между плотностью тока  $j$  (движущимся электричеством) и плотностью заряда  $\rho$  (электрическим покоящимся) в описанной выше максвелловской модели никаких связей нет. Они появятся позже, после введения понятия тока смещения и соответствующего ему следствия – уравнения непрерывности  $\operatorname{div} j + \frac{d\rho}{dt} = 0$ .

И в 1861 г. начинается публикация (в четырех частях) статьи «О физических линиях силы» [32]. Цель ее первой части – переполучить результаты теорий Вебера и Неймана исходя из новой, «вихревой», механической модели несжимаемой жидкости, основанной на исследованиях В. Томсона. Согласно Томсону, если явления электричества имеют поступательный характер, то явления магнетизма – вращательный. Важно, что Томсон ввел модели вихрей в несжимаемой жидкости при теоретическом воспроизведении опытов Фарадея по вращению плоскости поляризации света в магнитном поле. *В попытках теоретического воспроизведения исследований Фарадея, на которые постоянно ссылался Максвелл, и произошла «встреча» оптики и теории магнетизма.*

В максвелловской модели магнитное поле теперь было представлено набором вихрей в несжимаемой жидкости, оси вращения которых совпадают с направлением магнитной силы в каждой точке. Но на этот раз нейтральный язык – не гидродинамика, а теория упругости, в которой отношения между силами математически описываются в виде тензоров, т.е. в виде комбинаций трех базисных натяжений по взаимно перпендикулярным осям. Тензорный аппарат механики сплошных сред обеспечивал создание нового диалекта нейтрального языка. Он позволил рассчитать силу, действующую на единичный объем вещества:  $F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$ . Первый член  $F_1$  – это сила, действующая на магнитный полюс; второй член  $F_2$  – сила магнитной индукции; третий и четвертый члены  $F_3 + F_4$  – сила, действующая на электрические токи.

Особая проблема, связанная с вихревой моделью, волновавшая еще выдвинувшего ее в XVIII в. Д. Бернулли [33], – это то, каким образом вращение передается от одной ячейки к другой так, чтобы каждая последующая ячейка вращалась в ту же сторону, что и предыдущая. Здесь, понял Максвелл, необходимо сделать еще одно допущение – предположить, что каждая ячейка окружена тонким слоем мелких частиц, получивших в механике название «колеса холостого хода» (idle wheels). Нельзя ли каким-то образом связать движение этих холостых частиц с проблемами электричества?

И во второй части статьи «О физических силовых линиях», которая была озаглавлена «Применение теории магнитных вихрей к электрическим токам», Максвелл подходит к тяжелейшему вопросу своей исследовательской программы: как «физически связаны эти вихри с электрическими токами, в то время как мы все еще находимся в сомнениях относительно природы электричества». Важно, что в этом пункте Максвелл, осознав ограниченность чисто механической модели для описания взаимосвязи явлений электричества и магнетизма, вынужден напрямую *займствовывать элементы теории действия на расстоянии*. Выражаясь языком методологической модели [34], Максвелл вынужден приступить к прямому конструированию *гибридных* теоретических моделей, состоящих из базисных объектов и сочетающих в себе черты принципиально разных, чужеродных теоретических схем.

Согласно принятой гипотетической модели электрический ток должен быть представлен переносом *электрически заряженных* частиц от одного вихря к другому. В итоге, пишет Максвелл, «в нашей теории эти частицы *играют роль* электричества. Их движение трансляции представляет собой электрический ток, их вращение служит передаче движения от одной части поля к другой, а тангенциальные давления, таким образом введенные в действие, являются собой электродвижущую силу. Концепция частицы, движение которой связано с вихрем, созданным движущимся контактом, может показаться несколько *неуклюжей* (awkward). Я не выставляю ее как вид связи, *существующей в природе*» [35].

Введя такие абстрактные теоретические объекты, как *частицы электричества* и *электрический ток*, представляющий собой перемещение этих частиц, Максвелл значительно отошел от представлений Фарадея. Ведь согласно Фарадею, электрические заряды должны рассматриваться как порождения точек окончания силовых линий, т.е. как не имеющие независимого субстанциального существования. Соответственно, в исследовательской программе Фарадея электрический ток должен рассматриваться не как движение реально существующих заряженных частиц, а как «ось энергии».

В этом вся британская «полевая программа», для которой поля первичны, а частицы вторичны. Эклектизм Максвелла – не временное отступление фанатичного последователя Фарадея. И после 1861 г. Максвелл продолжил введение элементов атомистики Ампера и Вебера в свои теории [36].

Но полученные результаты были, конечно, недостаточными. В частности, не хватало теоретического воспроизведения основного закона

электростатики – закона Кулона. Именно это и было сделано в третьей части работы «О физических силовых линиях». Важно, что модель вихря содержала слишком много искусственных предположений (допущений *ad hoc*), введенных специально для того, чтобы утвердить существование вихрей. И тут мы подходим к «чуду Максвелла». Оказалось, что если мы в процессе встречи френелевской оптики и теории электромагнетизма перенесем некоторые свойства эфира из оптики в теорию электромагнетизма, то избавимся по меньшей мере от одной гипотезы *ad hoc*. В самом деле, для объяснения передачи вращения от внешних частей каждой ячейки к внутренним «необходимо предположить, что вещество в ячейке обладает упругостью формы (*elasticity of figure*), сходной по природе с той, которая наблюдается у твердых тел, хотя и отличающейся от нее по степени. *Волновая теория света заставляет нас признать именно этот вид упругости в светоносном веществе – для того чтобы объяснить поперечные колебания.* Поэтому мы не должны удивляться, если магнитоэлектрическое вещество обладает теми же самыми свойствами» [37].

Это обстоятельство имеет принципиальное значение для разрабатываемого Максвеллом нейтрального языка наблюдений. «Если мы сможем теперь объяснить состояние тела по отношению к окружающему веществу, когда говорится, что оно “заряжено” электричеством, и объяснить силы, действующие между наэлектризованными телами, мы тем самым сможем установить *связь* между всеми феноменами электрической науки» [38].

Таким образом, распространение теории молекулярных вихрей на явления электростатики оказалось возможным именно из-за учета упругости вихрей, которые делают магнитоэлектрическую субстанцию способной поддерживать волны упругости. В итоге «скорость поперечных колебаний в нашей гипотетической среде, подсчитанная на основе электромагнитных экспериментов М.М. Кольрауша и Вебера, настолько точно совпадает со скоростью света, подсчитанной на основе оптических экспериментов М. Физо, что мы едва ли сможем избежать вывода о том, что свет состоит из поперечных колебаний *той же самой среды*, которая служит причиной электрических и магнитных явлений» [39].

Введение тока смещения было следствием попыток Максвелла связать уравнения, относящиеся к электрическому току, с уравнениями электростатики, что потребовало модификации закона Ампера за счет введения нового члена, описывающего упругость вещества, из которого состоят вихри. Импульсом, побудившим Максвелла ввести ток смеще-

ния, послужили попытки *объединить* все основные эмпирические законы, относящиеся к области явлений электричества и магнетизма, а также оптики, откуда свойство упругости эфира и было перенесено. В итоге Максвелл получил свою знаменитую систему уравнений вместе с уравнением непрерывности, показывающим, что электрически заряженные частицы, передающие вращение от одного вихря к другому, не возникают и не исчезают.

Основным достижением статьи «О физических силовых линиях» некоторым современникам Максвелла представлялось доказательство утверждения, согласно которому «свет состоит из поперечных колебаний той же среды, которая служит причиной электрических и магнитных явлений». Но и этот результат выглядел довольно сомнительным. Например, при подсчете давлений в веществе, приводящих к магнитным силам, Максвелл рассматривал вихревые ячейки в качестве круговых цилиндров, что, конечно, было отклонением от сферической формы. Сам Максвелл полагал, что подобные аппроксимации были, «вероятно, разумны», приводя к результату, который «не намного отличается от правильного». Но когда Сигел рассчитал разницу в аппроксимации сферы цилиндром, описанным вокруг нее, у него получилось, что результаты будут различаться в 1,5 раза [40].

Кроме этой аппроксимации, в которой Максвелл отдавал себе отчет, он, как отмечал еще П. Дюгем, сделал по меньшей мере одну явную ошибку в расчетах: он ошибся в  $\sqrt{2}$  раза. Поэтому Максвеллу невероятно повезло, что он все-таки получил правильное выражение для скорости распространения поперечных колебаний в эфире. Судя по всему, он просто выбрал самое простое соотношение, связывающее скорость электромагнитных возмущений со скоростью света. Но все его выкладки не были строгим доказательством, поскольку основывались на расчетах, справедливых только относительно сконструированных (гибридных) моделей. Строго говоря, расчеты Максвелла доказывали то, на чем они были основаны: что электромагнитный и светоносный эфиры – одно и то же вещество.

В итоге ни о каком окончательном объединении электричества, магнетизма и оптики в 1861 г. не приходилось и говорить. Можно было уверенно заявлять лишь о *начале согласования* – о взаимопроникновении френелевской оптики, фарадеевской концепции поля и ампер-веберовской электродинамики, ставшем возможным за счет конструирования системы теоретических объектов из базисных объектов всех трех упомянутых программ.

Правильнее было бы сказать, что *Максвелл положил начало не столько объединению электродинамики и теории магнетизма, сколько объединению британской и континентальной, т.е. полевой и корпускулярной, традиций рассмотрения электромагнитного взаимодействия.* (Тем не менее сам Максвелл был бы, возможно, не в восторге от того, что впоследствии сделали с его электродинамикой О. Хевисайд и Г. Лоренц. Ведь согласно Лоренцу, заряды и поля – две одинаково независимые сущности электромагнитных процессов.) Представление о токе смещения лишь запустило механизм объединения оптики и теории электромагнетизма, сыграло роль «существенного параметра объединения», по терминологии М. Моррисон, или «гибридного объекта», по нашей терминологии. Несмотря на то что на последующих стадиях развертывания теории идея эфира была отброшена, понятие тока смещения осталось как звено, объединявшее оптику и теорию электромагнетизма.

И наконец, в 1864 г. Максвелл представил усовершенствованный вариант «Динамической теории электромагнитного поля» [41], в котором он старался избегать каких-либо детализаций устройства и взаимосвязи молекулярных вихрей. В этой работе Максвелл выводит уравнения электромагнитного поля не из модели, а из принципа наименьшего действия, из лагранжиана, специально сконструированного для электромагнитного поля. Но для этого лагранжиан сначала надо правильно построить, что Максвелл и делает исходя из определенных «очевидных» умозрительных принципов. Но несмотря на все это, его вывод все-таки требовал *постулирования* тока смещения [42].

## Примечания

1. См.: *Siegel D.M.* Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory: Molecular Vortices, Displacement Current, and Light. – Cambridge Univ. Press, 1991.

2. См.: *Morrison M.* Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures. – Cambridge Univ. Press, 2000.

3. См.: *Darrigol O.* Electrodynamics from Ampere to Einstein. – Oxford Univ. Press, 2001.

4. Цит. по: *Campbell L., Garnett W.* The Life of James Clerk Maxwell. – L., Macmillan, 1882. – P. 105.

5. *Максвелл Дж.К.* Трактат об электричестве и магнетизме // Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля / Пер. З.А. Цейтлина. – М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1952. – С. 599.

6. См., например: *Darrigol O.* Electrodynamics from Ampere to Einstein.

7. См.: *Шapiro И.С.* К истории открытия уравнений Максвелла // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108, вып.2. – С. 319–333.

8. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force* // *The Transactions of the Cambridge Philosophical Society.* – 1856. – V. X, p. 1. Reprinted in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.* – 1890. – VI. 1. – P. 155–229.
9. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*
10. См.: *Jones B. Faraday's Life and Letters.* – Philadelphia: J.D. Lippincott, 1870. – V. 1, 2.
11. Подробнее см.: *Nersessian N.J. Faraday's field concept* // *Faraday Rediscovered* / Ed. by D. Gooding, F. James. – N.Y., 1985.
12. См., например: *Kuhn T.S. Objectivity, value judgement and theory choice* // *The Essential Tension.* – Univ. of Chicago Press, 1977. – P. 320–339; *Lakatos I. The Methodology of Scientific Research Programmes* / *Philosophical Papers*: ed. by J. Worral, G. Currie. – Cambridge Univ. Press, 1978. – V. 1.
13. См.: *Нугаев P.M. Эйнштейновская научная революция 1898–1915: интертеоретический контекст.* – Казань: Логос, 2010; *Он же. Коперниканская научная революция: синтез физики Земли и математики Неба.* – Казань: Логос, 2012.
14. *Большман Л.* Комментарии к статье Максвелла «О фарадеевских линиях сил» // *Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.* – С. 89–106.
15. См. также: *Стетин В.С. Теоретическое знание.* – М.: Прогресс-Традиция, 2000.
16. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.* – P. 155.
- 17.
18. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*
19. См.: *Maxwell J.C. Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz* // *Nature.* – 1877. – V. XV. Reprinted in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.* – 1890. – V. 2. – P. 592–598.
20. *Кант И.* Прологомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука / Пер. Вл. Соловьёва // *Кант И. Трактаты.* – СПб.: Наука, 2006. – С. 236–237.
21. *Кант И.* Критика чистого разума / Пер. Н. Лосского). – 2-е изд. – М.: Эксмо, 2006. – С. 222.
22. Цит. по: *Campbell L., Garnett W. The Life of James Clerk Maxwell.* – P. 121.
23. Цит. по: *Campbell L., Garnett W. The Life of James Clerk Maxwell.* – P. 122.
24. Цит. по: *Campbell L., Garnett W. The Life of James Clerk Maxwell.* – P. 112.
25. *Maxwell J.C. Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz.* – P. 592.
26. Подробнее см.: *Harman P.M. The Natural Philosophy of J.C. Maxwell.* – Cambridge Univ. Press, 2001.
27. *Maxwell J.C. Ether* // *Encyclopedia Britannica.* – P. 315. Reprinted in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.* – 1890. – V. 2. – P. 763–775. См. также: *Нугаев P.M. Коперниканская научная революция...*
28. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*
29. См.: *Maxwell J.C. On physical lines of force* // *Philosophical Magazine.* – 1861. – V. XXI. Reprinted in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.* – 1890. – V. 1. – P. 451–513.
30. См.: *Maxwell J.C. Dynamical Theory of Electromagnetic Field.* – 1864. Reprinted in: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell.* – 1890. – V. 1. – P. 526–597.
31. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*
32. См.: *Maxwell J.C. On physical lines of force.*
33. Подробнее см.: *Whittaker E. A History of the Theories of Aether and Electricity: from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century.* – London; New York: Longmans, Green and Co., 1910.
34. *Нугаев P.M. Коперниканская научная революция...*
35. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*
36. См.: *Darrigol O. Electrodynamics from Ampere to Einstein.*
37. См.: *Maxwell J.C. On Faraday's lines of force.*

38. Ibid.  
39. Ibid. – P. 19.  
40. См.: *Siegel D.M.* Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory... – P. 136.  
41. См.: *Maxwell J.C.* Dynamical Theory of Electromagnetic Field.  
42. См.: *Morrison M.* Unifying Scientific Theories... – P. 85.

Дата поступления 08.08.2013

Казанский филиал Российского  
университета кооперации, г. Казань  
kafedra\_gum@kki-ruk.ru  
rinatnugaev@mail.ru

***Nugayev, R.M.* The genesis of maxwellian electrodynamics: the inter-theoretic context**

The paper considers the genesis of maxwellian electrodynamics in the light of the author's theory-change model which was tested earlier for the cases of Copernican and Einsteinian scientific revolutions. The author shows that in the considered case the new theory arisen at the cross of pre-maxwellian research programs. Continuum mechanics appeared to be a "neutral language" used for comparing conclusions of theories developed in these programs and revealing relations between them. Maxwell's program not just excelled Ampere and Weber's program but assimilated some its theses. The ideas of Kantian epistemology are the basis of Maxwell's strategy of unifying theories.

**Keywords:** theory, scientific program, scientific revolution, model, Maxwell, electrodynamics