

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ТРУДАХ РУССКИХ ФИЗИКОВ ДО ОПЫТОВ ГЕРЦА****В. М. Дуков****ВВЕДЕНИЕ**

Создание учения об электромагнитном поле ознаменовало целую эпоху в развитии физики и техники.

В истории рождения и развития этого учения особенно ярко проявилась прогрессивная сила материалистического мировоззрения. Теории Ампера, Вебера, Неймана и других учёных, построенные на концепции дальнего действия, не отражали качественных особенностей электромагнитных явлений, не объясняли опытных фактов; они толкали учёных на путь математического формализма, были лишены живого, стимулирующего творческую мысль содержания.

С переходом теории электрических и магнитных явлений на позиции материалистической концепции ближнего действия, утверждённой ещё великим Ломоносовым, открылись плодотворные пути исследования электромагнитных явлений.

История показывает, что этот переход совершился в результате жестокой борьбы нового со старым. Понадобилось около полувека, чтобы теория электрических и магнитных явлений целиком перешла на позиции ближнего действия и дала начало развитию учения об электромагнитном поле.

В этой борьбе большую, прогрессивную роль сыграли русские учёные. Исторические факты показывают, что ещё до опытов Герца русские физики накопили богатый материал, поставивший теорию электромагнитного поля на прочный фундамент опыта и давший стимул к её дальнейшему развитию.

К сожалению, эти факты до сих пор не освещены в нашей литературе. Поэтому историю развития классической теории электромагнитного поля представляют по схеме Фарадей-Максвелл-Герц-Лоренц. Считается, что до опытов Герца максвелловская теория

поля была в забвении, учёные смотрели на неё, как на некий курьёз. В литературе часто приводят слова Больцмана о том, что до опытов Герца «Трактат по электричеству и магнетизму» Максвелла был «книгой за семью печатами».

Обнаруженные в последнее время материалы, относящиеся к развитию русской физики того периода, когда формировалась теория поля, показывают ложность этой исторической концепции.

Цель настоящей статьи — восстановить истинную картину развития теории электромагнитного поля до опытов Герца и показать, что решающая роль в создании экспериментальной базы этой теории принадлежит русской физике.

1. ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Интенсивное изучение электрических и магнитных явлений началось только с середины XVIII в. До конца века были открыты основные факты, относящиеся к свойствам статического электричества и магнетизма, которые подготовили почву для построения теории этих явлений. Как известно, в основу первых теорий электричества и магнетизма было положено представление о существовании особых электрических и магнитных жидкостей. Многочисленные гипотетические построения, с помощью которых учёные пытались объяснить наблюдаемые явления, делились на две группы: сторонники первой группы так называемых унитарных теорий, среди которых наиболее видное место занимал В. Франклин, принимали только один вид электрической жидкости; другие учёные защищали дуалистическое воззрение, предполагавшее существование двух жидкостей (Дюфэ, Симмер и др.). Теоретические построения в этой области носили чисто качественный характер. Только после работ петербургского академика Ф. У. Т. Эпинуса по теории электричества и магнетизма и открытия в 1785 г. Кулоном закона взаимодействия заряженных тел и магнитов началось построение количественной теории явлений.

В развитии учения об электромагнитном поле, выросшего в XIX в. на большом опытном материале, огромную роль играла борьба двух концепций в физике — дальнего действия (*actio in distans*) и ближнего действия.

Эти концепции возникли на базе ньютонианского и картезианского мировоззрений. Ньютонианцы, провозгласившие доктрину «*actio in distans*», сводили все процессы природы к взаимодействию материальных точек центральными дальнедействующими силами, отрицали участие промежуточной среды в передаче этих взаимодействий.

Прикрываясь авторитетом Ньютона (который в действительности считал абсурдной мысль о возможности передачи взаимодействия через пустоту), ньютонианцы пропагандировали теорию врождённых свойств материи. Благодаря их усилиям эта метафизическая теория

была широко распространена в XVIII — начале XIX вв. и явилась большим тормозом в развитии науки.

Русские учёные всегда находились в первых рядах борцов с идеалистическими течениями в науке. Ломоносов активно выступил против спекулятивных взглядов сторонников дальнего действия. Вместе с ним был Эйлер, постоянно поддерживавший, а порой развивавший идеи великого русского учёного. Переписка Ломоносова и Эйлера показывает, что они выступали рука об руку в борьбе против реакционного ньютонианства. В одном из писем к Эйлеру¹ Ломоносов, например, осмеивал тех, кто считает тяжесть врождённым свойством материальных тел и «не находит нужным исследовать её причины».

Письма и научные труды Ломоносова показывают, что он боролся за те методологические установки, которые способны открыть «широкий простор для лучшего объяснения многих явлений». Подвергнув глубокому анализу воззрения картезианской и ньютонианской школ, Ломоносов сумел правильно оценить их положительные и отрицательные стороны. Он отделил положительное содержание ньютоновского учения от спекуляций ньютонианцев и стал активным противником последних.

Доктрина «*actio in distans*» была органически враждебна материалистическому мышлению Ломоносова. Великий русский учёный развивал в своих трудах идею вечности материи и движения, безусловности причинных связей между явлениями природы. Отсюда — отрицание пустоты и утверждение невозможности передачи взаимодействий без участия промежуточной среды — основа физической концепции близкодействия, сыгравшей огромную роль в развитии науки.

В трудах Декарта близкодействие фигурировало в качестве мировоззренческого принципа, носило чисто умозрительный характер. Гюйгенс распространил эту концепцию лишь на область световых явлений. Только у Ломоносова близкодействие приобрело значение физической, действенной концепции, лежащей в фундаменте самого метода научного исследования.

Вопреки призывам ньютонианцев, Ломоносов глубоко вдумывался в природу физических явлений и строил плодотворные научные гипотезы, часто превосходящие значительно более поздние достижения физики. Он развил теорию оптических явлений, рассматривая свет как колебательный процесс в эфире, обладающем определённой структурой.

Причину электрических явлений Ломоносов усматривал в движении среды, окружающей взаимодействующие тела. Вот одно из его замечательных высказываний: «Электрические явления: притягивание и отталкивание, свет и огонь состоят в движении. Движение не может быть возбуждено без другого движущегося тела. Тела, значительно удалённые от наэлектризованных тел, не подвержены их действию. Поэтому должна существовать нечувствительная жидкая

материя, разливающаяся вне электрованного тела и производящая такого рода действия, изменяющаяся под влиянием электричества»².

Для Ломоносова единственная причина, источник физических явлений — движение материй, и эта посылка приводит его к следующему выводу.

«Так как эти явления имеют место в пространстве, лишённом воздуха, а свет и огонь происходят в пустоте и зависят от эфира, то кажется правдоподобным, что эта электрическая материя тождественна с эфиром».

«...Наконец, если не найдётся никакой другой материи, то достовернейшая причина электричества будет движущийся эфир».

Мысль о единстве материального субстрата электрических и световых явлений приводит Ломоносова к заключению о возможности обнаружения связи между этими явлениями. В своей программе работ в области теории электричества он отмечает: «Надо сделать опыт, будет ли луч света иначе преломляться в наэлектризованном стекле и воде»³.

Воззрения Ломоносова были развиты Эйлером. Наиболее отчетливое оформление они получили в знаменитых «Письмах к немецкой принцессе»⁴.

Однако эти воззрения шли в разрез с господствовавшей в то время в физике ньютоновской программой и не нашли поддержки за границей.

Только почти в середине XIX в. они были возрождены в трудах Фарадея и Максвелла.

Конец XVIII — начало XIX в. был периодом развития теории электричества и магнетизма на базе ньютоновского метода. Кулон, Лаплас, Пуассон и Гаусс, развившие в серии работ подробную теорию статического электричества и магнетизма, исходили из представления о мгновенном действии на расстоянии. Это были логически строгие теории с изящным математическим оформлением; они хорошо соответствовали известным в то время опытным фактам. Естественно, что эти работы укрепляли позиций сторонников дальнего действия.

Концепция близкодействия сохранила свои корни лишь в оптике. Юнг, Френель, Коши, а за ними Грин развивали теорию оптических явлений, исходя из представления о механических колебаниях упругого эфира.

С развитием электродинамики в начале XIX в. были, естественно, предприняты попытки построить теорию динамического электричества по образцу и подобию статических теорий, исходя из принципов ньютоновской механики. Такой теорией явилась электродинамика Ампера.

Расцвет электродинамики Ампера относится к 20-м годам XIX в., необычайно богатым открытиями опытных фактов в области электродинамики. В 1820 г. Эрстед в своей знаменитой брошюре «Опыты,

касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку», описал фундаментальный факт действия электрического тока на магнитную стрелку. В этом же году Араго нашёл, что обтекаемый током медный провод притягивает железные опилки, а затем осуществил первый электромагнит, намагнитив помещённую внутрь соленоида стальную иглу. Ампер открыл взаимодействие токов, а Био и Савар сообщили о найденной ими закономерности в воздействии прямолинейного тока на магнитную стрелку. Богатство опытного материала создавало прочную базу для теории и стимулировало её развитие.

При построении электродинамики Ампер строго следовал ньютоновскому методу принципов. Характерной чертой его воззрений было убеждение в возможности свести электродинамические процессы к сумме взаимодействий между «элементами токов», взаимодействий центрального характера, распространяющихся мгновенно от одного элемента к другому. Ложная идея об электричестве как субстанции, лишённой инерции, одно из основных положений электродинамики Ампера.

В открытую физикой новую область явлений природы Ампер и его последователи перенесли в сущности те же представления, которые лежали в основе изучения механических явлений. Несмотря на то, что эксперимент Эрстеда показал, что электромагнитным явлениям свойственны новые своеобразные черты, что здесь проявляются силы явно нецентральные, сторонники амперовской электродинамики продолжали попытки сведения электромагнитных явлений к явлениям чисто механического характера, к перемещению частей тел электродинамической системы.

По пути Ампера шло большинство теоретиков. Основной поток исследований в области теории электромагнетизма базировался на концепции «*actio in distans*», и эти исследования не дали скольконибудь существенных результатов.

Указанная линия развития теории электромагнетизма встретила непримиримого противника в лице Фарадея. Гениальный самоучка создал новый метод исследования электромагнитных явлений. На первый план Фарадей выдвинул изучение причинных связей физических явлений. В своих исследованиях он пытается проникнуть в механизм процессов движения материи, которые вызывают наблюдаемые физические явления. В противовес Амперу, Фарадей смело пользуется научной гипотезой о «природе производящих явления сил». Опираясь на экспериментальные факты, он строит систему новых физических воззрений.

Научный метод Фарадея безусловно имеет много общего с творчеством великого Ломоносова. И эта связь не случайна. П. С. Кудрявцев в «Истории физики»⁴ справедливо замечает, что «в исследованиях Фарадея живо чувствуется влияние „Писем“ Эйлера..., которые были одной из книг, оказавших сильное влияние на

молодого Фарадея. Но так как воззрения Эйлера примыкали к ломоносовским, то можно установить замечательную преемственность: Ломоносов — Эйлер — Фарадей». Материалистическое мировоззрение объединяет этих учёных, и этим обусловлена плодотворность их научных результатов.

Не случайно Фарадей при обосновании концепции силовых линий обращался к тому месту «Писем»³, где, по существу, изложена Эйлером ломоносовская эфирная теория электричества.

В третьем томе «Экспериментальных исследований»⁵ Фарадей приходит к выводу, что «линии сил имеют физическое существование». При этом он делает в сноске характерное замечание: «См. точку зрения Эйлера на расположение магнитных сил; также на магнитную жидкость, или эфир и его истечение» и отсылает к письмам 62 и 63. Далее, в том же томе на стр. 540 Фарадей ссылается на «Письма» при обсуждении влияния среды на магнитные явления.

Фарадей возродил идею Ломоносова и Эйлера о непременном участии материальной среды в процессах взаимодействия, о единой материальной природе электромагнитных явлений.

Конкретным физическим выражением этой идеи явилось представление о силовых линиях, которое послужило руководящей нитью замечательных экспериментальных исследований Фарадея и сыграло большую роль в изучении электромагнитных явлений.

Фарадей сделал смелый шаг, изгнав из теории электромагнитных явлений идею о центральных действующих силах. Там, где сторонники амперовской электродинамики видели только расстояние, Фарадей видел арену сложных, многообразных явлений. Именно процессы, происходящие в среде, которая окружает взаимодействующие электродинамические объекты, обуславливают согласно Фарадею специфический характер электромагнитных явлений. Модельным выражением этих процессов явилась картина силовых линий различной конфигурации. Именно здесь лежат истоки учения об электромагнитном поле, развитие которого начинается Фарадеем.

Фарадей не пользовался математическим аппаратом при анализе электромагнитных явлений. Вся глубина и плодотворность фарадеевских воззрений обнаружили лишь после математического оформления их Максвеллом.

«Прежде чем я начал изучать электричество, — писал Максвелл^{6а}, — я принял решение не читать никаких математических сочинений, посвящённых данному вопросу, до прочтения фарадеевских „Опытных исследований по электричеству“ от начала до конца. Я был осведомлён, что высказывалось мнение о различии между фарадеевским методом понимания явлений и методами математиков, так что ни Фарадей, ни математики не были удовлетворены языком друг друга.

Когда я стал углубляться в изучение Фарадея, я заметил, что его метод понимания явлений также математичен, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я нашел также, что этот метод может быть выражен в обычной математической форме, и, таким образом, может быть сопоставлен с методами профессиональных математиков».

Насколько тесной была связь между фарадеевскими физическими воззрениями и творчеством Максвелла говорит следующий интересный факт. В своей лекции «История электромагнетизма» В. Г. Брэгг⁶ рассказывает: «Несколько лет назад мне довелось просматривать одну книгу в библиотеке Королевского общества. Когда я открыл её, оттуда выпал листок бумаги. Это была заметка, подписанная Клерком Максвеллом, в которой говорилось следующее: Электромагнитная теория Св. (света) предлож. им (Фарадеем) в „Мыслях о лучевых колебаниях“ (Phil. Mag., 1846, Май) или „Эксп. иссл.“ (Experiment. Research., III, стр. 447). Это по существу то же, что я начал развивать в этой статье „Динамич. теория электр. поля“, (Phil. Trans., 1865), за исключением того, что в 1846 году не было данных для вычисления скорости распространения.

Дж. К. М.».

Основы теории электромагнитного поля были изложены Максвеллом в трёх работах: «О фарадеевых линиях сил» (1855 г.), «О физических линиях сил» (1864 г.) и «Динамическая теория электромагнитного поля» (1865 г.).

Первая работа содержала непосредственное математическое оформление идей Фарадея; здесь были, по существу, сформулированы основные уравнения электромагнитного поля без учёта тока смещения; фундаментальным результатом второй работы является введение в уравнения поля тока смещения и, наконец, в последней работе были даны основные положения электромагнитной теории света.

В двухтомном «Трактате», появившемся в свет в 1873 г., был подведён итог полувековых исследований в области электромагнетизма как предшественников и современников Максвелла, так и его собственных.

Наиболее отчётливо основы максвелловской теории изложены в «Динамической теории электромагнитного поля»⁷. Именно в этой работе и появляется впервые определение его теории как теории поля.

«Теория, которую я предлагаю, — писал здесь Максвелл, — может... быть названа теорией электромагнитного поля, так как она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела. Она может быть также названа динамической теорией, потому что она предполагает, что в этом пространстве имеется находящаяся в движении материя, производящая наблюдаемые электромагнитные явления».

Так же, как и Фарадей, Максвелл руководствовался в своих исследованиях материалистическими воззрениями. Характерными чертами его научного метода были: возможно полное отражение закономерностей электромагнитных явлений в математическом аппарате, построение такого аппарата, адекватного концепции близкодействия, широкое использование аналогий, выражающих связь между явлениями природы, стремление математически выразить эту связь. Максвелловская теория электромагнитного поля бесспорно является ярчайшей иллюстрацией плодотворности физической теории, основанной на материалистическом мировоззрении.

Теория электромагнитного поля привлекла заметное внимание учёного мира после выхода в свет «Трактата» в 1873 г. Как это часто бывает в истории науки, смелость и оригинальность новых идей, нового метода теоретического исследования вызвали оппозицию большинства крупных физиков, скептическое, порой даже враждебное отношение к теории Максвелла. Во Франции, в Германии, даже на родине гениального учёного почти до конца века не прекращались выступления против новых физических воззрений, против метода построения теории электромагнитного поля, против отдельных выводов новой теории.

Учёные, сжившиеся с традиционными механическими воззрениями, с простой и наглядной картиной материи как однородной совокупности материальных точек, между которыми действуют центральные силы, с безупречными с точки зрения «чистой» математики ньютоновскими методами исследования физических проблем, с трудом воспринимали фарадей-максвелловские воззрения. Например, И. И. Боргман в речи «Электромагнитная теория света Максвелла»⁸ говорил:

«Идеи Фарадея относительно влияния изоляторов или, как он назвал, диэлектрических тел на электростатическую индукцию, равно как и его идея электротонического состояния среды при распространении в этой среде электромагнитных действий не были приняты, можно сказать, даже встретили враждебный отпор со стороны германских физиков». Такое же указание мы находим в «Истории физики» Розенбергера⁹. Естественно, что аналогичный приём встретило и математическое оформление этих идей Максвеллом.

Вот что писал один из соотечественников Фарадея и Максвелла — известный английский физик Дж. Б. Эри¹⁰:

«Я никак не могу себе представить, чтобы кто-нибудь, имеющий понятие о совпадении между опытом и результатом вычисления, основанного на допущении закона дальнодействия, хотя бы один момент мог колебаться, чему отдать предпочтение, этому ясному и понятному действию (на расстоянии — В. Д.), или чему-то весьма неясному и туманному, как силовые линии».

Максвелл решительно порвал с ньютоновским методом принципов, которому в течение более чем ста лет следовали физики, и это

вызвало оппозицию, суть которой хорошо выразил А. Пуанкаре во введении к известному труду «*Électricité et Optique*»:

«Когда француз впервые сталкивается с работами Максвелла, к испытываемому им восхищению примешивается чувство досады и зачастую даже враждебности, от которых удаётся отделаться не скоро и лишь ценой значительных усилий. Некоторые выдающиеся умы сохранили это впечатление навсегда.

Почему же, однако, идеи английского учёного прививаются у нас с таким трудом? Причина этого, несомненно, заключается в том, что образование, получаемое большинством французов, развивает в них склонность к тому, чтоб ценить прежде всего логичность и точность.

С этой точки зрения старые теории математической физики вполне нас удовлетворяли. Таков был метод всех наших учителей, начиная от Лапласа и кончая Коши. Исходя из точно сформулированных гипотез, они с математической точностью выводили из них все следствия, которые затем сравнивали с опытом. Они как бы стремились придать всем областям физики точность небесной механики».

Широкое использование Максвеллом механических аналогий пришлось не по вкусу учёным, привыкшим к «логичности и точности» испытанных теорий. «Мы надеялись попасть в заботливо упорядоченное хозяйство дедуктивного разума, а попали на какой-то завод», — жаловался известный идеалист П. Дюгем, говоря о максвелловском «Трактате».

Были за границей учёные, которые восприняли и развивали фарадей-максвелловские воззрения; назовём, например Гельмгольца и Больцмана. Однако их было немного.

Тем более поразительным кажется отношение русских учёных к теории электромагнитного поля. Эта теория поистине нашла в России вторую родину.

Факты показывают, что теория электромагнитного поля была воспринята русскими учёными как прогрессивная, плодотворная физическая теория, которую необходимо укреплять и развивать. В этом нельзя не видеть проявление передового материалистического духа русской науки, свято хранящей славные традиции великого Ломоносова.

Прежде чем перейти к изложению материала, подтверждающего это положение, необходимо подчеркнуть следующее.

Максвелл строит теорию электромагнитного поля, развивая фарадеевские физические воззрения, опираясь на обширный опытный материал, добытый в области электромагнетизма. Однако его теория не была простым математическим оформлением идей Фарадея, непосредственным выражением опытных фактов в математической форме. Она содержала качественно новые черты, новые закономерности. Самое существенное заключалось в том, что максвелловская теория поля дала возможность для предсказания новых связей, новых явлений, причём характерно, что эти связи и явления были необычны для

физики середины XIX в., они разрушали целый ряд фундаментальных представлений, прочно освоенных и канонизированных классической физикой. Это обстоятельство обусловило в то же время шаткость позиций новой теории, поскольку почти ни один из предсказанных ею фактов не находил опоры в эксперименте. В самом деле, обратимся к этим фактам.

1. Центральным пунктом максвелловской теории была гипотеза о существовании токов смещения. До Максвелла для физиков токи существовали только в проводниках и электролитах; токи имели «концы», обрываясь на границах с диэлектриками или «пустотой».

Максвелл, фигурально выражаясь, «оживил» пустоту; он сделал её ареной сложных физических явлений, определяющих характер электромагнитных процессов, он указал на объективную реальность той формы материи, которую мы называем в настоящее время электромагнитным полем. Ток в пустоте, образующий магнитное поле, — эта смелая идея была противна «здравому» смыслу большинства спокойнио пльвших по течению физиков; она рушила фундамент воззрений ньютоналинцев — доктрину «*actio in distans*» и вместе с тем подрывала основы амперовской электродинамики, господствовавшей в то время в теории электромагнетизма.

2. Вторым, не менее важным, опять же революционным пунктом максвелловской теории была гипотеза: «свет представляет собой электромагнитное колебание». Эта идея рушила привычные, казалось, прочно сложившиеся представления оптики упругого эфира, пережившей совсем недавно свой триумф.

Непосредственными следствиями электромагнитной теории света, доступными экспериментальной проверке, были: а) связь между электрическими и оптическими характеристиками вещества ($\epsilon = n^2$); б) равенство скорости света (c) и величины отношения электростатических и электромагнитных единиц заряда (ν_0). Необходимо здесь же отметить, что пункт б) был единственным, связывавшим теоретические построения Максвелла с экспериментом. Однако обнадежившее вначале совпадение результатов измерений величины ν_0 Вебером и Кольраушем (1856 г.) и скорости света Физо при проверке оказалось не столь убедительным, так что и этот пункт, в сущности, не имел прочной экспериментальной опоры.

Далее следует указать на «пародоксальное» следствие максвелловской теории: в) возможность давления света. Мы не будем останавливаться на этом интересном пункте. Он достоин специальной статьи, тем более, что честь теоретического и экспериментального обоснования этого положения принадлежит русской физике.

3. Третье важное следствие новой теории — возможность существования свободной электромагнитной волны и её подчинение законам оптики при взаимодействии с веществом, иначе говоря, общность свойств электромагнитных и световых волн. Это следствие, как нам представляется, непосредственно вытекает из пунктов 1 и 2.

4. Наконец, следует выделить четвёртое положение, имеющее принципиальное значение. Оно касается исходной посылки максвелловской теории—инерции «электричества».

В противовес амперовской электродинамике, рассматривавшей «электричество» как невесомый (безинертный) агент, Максвелл базировался на гипотезе о «весомых электрических массах». В «Трактате»^{5а} при построении уравнений электромагнитного поля Максвелл заменяет систему магнитов, заряженных тел и проводников с током эквивалентной системой «весомых масс» и «электрических масс» и применяет к этой системе лагранжевы уравнения динамики.

Максвелл показал, что кинетическая энергия такой системы может быть представлена в виде сумм трёх членов: $T = T_m + T_e + T_{me}$, где T_m обусловлена механическим перемещением проводников, T_e — движением «электричества» и T_{me} — «пондеро-электрокинетическая» часть энергии электромагнитного поля—выражает связь между движением «электричества» и перемещением проводников в поле. Существование члена T_{me} означает наличие известного эффекта, когда при ускорении или остановке движущегося проводника в нём возбуждается электрический ток.

Предположение об инертности электричества не имело никаких опытных оснований, и это делало основы теории поля ещё более шаткими. Максвелл, сознавая это, приложил много усилий для экспериментального доказательства существования «пондеро-электрокинетической» части энергии электромагнитного поля. Он писал в «Трактате»¹², что в случае обнаружения реальности T_{me} «мы могли бы рассматривать одно из так называемых электричеств, положительное или отрицательное, как реальную субстанцию и могли бы приписать электрическому току действительное движение этой субстанции в определённом направлении». Однако усилия Максвелла не увенчались успехом.

Десять лет после оформления основ теории поля не дали ни одного экспериментального факта для её укрепления и развития. Новая теория оставалась в забвении, пока на сцену не выступила школа русских физиков, руководимая А. Г. Столетовым.

2. СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

О глубоком интересе А. Г. Столетова к теории электромагнитного поля говорит целый ряд документов. Приведём наиболее характерные. В письме Столетова физическому отделению Русского физико-химического общества¹³ интересны следующие строки: «В 1862 — 1863 гг. бывший доцент Московского университета К. А. Рачинский и я занимались в Гейдельберге и Геттингене опытами над влиянием диэлектрической среды на электромагнитные

явления». В «Речах и протоколах VI съезда русских естествоиспытателей и врачей» (1879 г.) сказано ¹⁴:

«Проф. А. Г. Столетов сообщает о своих опытах, имеющих целью определить электромагнитную постоянную (φ Максвелла) — отношение магнитной единицы электричества к электрической единице. Референт указывает важное значение этой постоянной, которая, по Максвеллу, выражает собой скорость распространения электромагнитных дистурбаций в среде... и по всей вероятности тождественна со скоростью световых волн для той же среды. Первоначальные опыты проф. Столетова произведены ещё в 1876 г., и о них краткий реферат сделан на Варшавском съезде того года. Окончание работы замедлилось по недостатку в некоторых измерительных приборах» (подчёркнуто мной. — В. Д.).

Ещё более важный документ мы находим в протоколах Первого Международного конгресса электриков в 1881 г. ¹⁵. Там сказано:

«Г-н Столетов (Россия) предлагает, чтобы Международная комиссия, которой поручено установление электромагнитных единиц, занялась бы также определением отношения электромагнитных и электростатических единиц, используя для этого все ресурсы современной науки. Важность этого вопроса для науки широчайшим образом оправдывает труды, сопряжённые с этим измерением».

Не случайно это предложение поступило от имени русских физиков. Россия, как мы увидим далее, была поистине второй родиной теории электромагнитного поля. Всё, что касалось развития этой теории, глубоко волновало русских физиков; своими работами они призывали учёных всех стран принять участие в укреплении позиций молодой прогрессивной теории. А. Г. Столетов направил усилия своих учеников на создание экспериментальной базы теории электромагнитного поля. Наиболее важные результаты в этом направлении принадлежат Николаю Николаевичу Шиллеру.

Начнём с анализа труда Н. Н. Шиллера «Электромагнитные свойства концов разомкнутых токов и диэлектриков» ¹⁶, опубликованного в 1876 г. Это обширное экспериментальное исследование было докторской диссертацией, выполненной учёным в 1875 г.

Шиллер начинает свою работу с изложения точек зрения Ампера, Гельмгольца и Максвелла на характер электродинамических взаимодействий. Поисками Ампера и Гельмгольца элементарного закона электродинамики Шиллер противопоставляет стремление Максвелла утвердить представление о токе смещения, который проходит через промежутки, заполненные диэлектриком.

О цели своего исследования Н. Шиллер пишет:

«Решить вопрос, которая из теорий имеет за собою большую вероятность, возможно только путём опытного исследования, что и составляет предмет описываемой в настоящей статье работы».

Подтвердить или опровергнуть гипотезу о существовании токов смещения *) — таков по Шиллеру путь решения проблемы. Однако для непосредственного доказательства реальности токов смещения он не нашёл возможностей и пошёл своеобразным окольным путём.

Необходимо указать прежде, что Гельмгольц, безуспешно искавший компромисс между электродинамикой Ампера и максвелловской теорией поля, также пытался экспериментально решить вопрос о существовании токов смещения (именно по его предложению Герц провёл впоследствии свои знаменитые опыты). В 1874 г. он выдвинул идею возможных опытов по обнаружению токов смещения. В своей работе Шиллер показал, что эти опыты практически не осуществимы и предложил свой путь решения вопроса.

Существо эксперимента, предложенного Шиллером, заключалось в следующем (рис. 1).

На острый металлического провода K при помощи электростатической машины подавался высокий потенциал так, что происходил разряд. Вблизи острия подвешивалось на нити стальное кольцо с двумя обмотками: первая служила для намагничивания кольца, вторая — для измерения сообщаемого ему магнитного момента. Поворот кольца можно было регистрировать с помощью зеркала Z и шкалы.

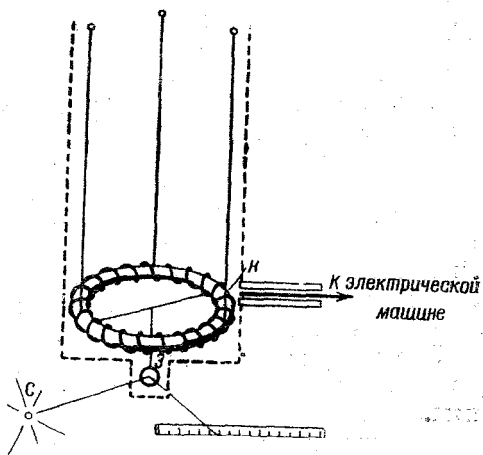


Рис. 1.

На основании данной Гельмгольцем теории¹⁷, построенной на базе амперовских воззрений **), зная размеры кольца, модуль кручения

*) Ток смещения Шиллер называет в этой работе «диэлектрической поляризацией».

**) Речь идёт о способе Гельмгольца нахождения элементарных сил, исходя из предположения, что всякая бесконечно малая работа элементарных сил при произвольных перемещениях элементов одного из проводников, связанных только условием непрерывности, равна отрицательному приращению потенциала как функции этих перемещений. Отсюда Гельмгольц получил выражение для силы взаимодействия между «концом» разомкнутого тока и одним из элементов некоторого замкнутого тока:

$$F = ijr \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{r} \right) ds, \text{ где } ds — \text{элемент замкнутого проводника, } i \text{ и } j — \text{плотность разомкнутого и замкнутого токов, } r — \text{расстояние элемента } ds \text{ от конца разомкнутого проводника.}$$

нити, напряжение «стекающего» с острия тока, можно было вычислить величину момента вращения кольца, которое должно было бы получиться в случае наличия «концов тока». Опуская детали самой теории, имеющей в настоящее время лишь исторический интерес, укажем, что Шиллер произвёл такого рода расчёты.

Тщательный анализ теории вопроса, проведённый Шиллером, показал, что в случае справедливости потенциальной теории следовало ожидать значительного угла закручивания подвешенного кольца при включении электрической машины (при удалении трубы от зеркала на 3 м — порядка 22,7 делений шкалы).

Однако экспериментально не было обнаружено никакого отклонения и Шиллер пришёл к следующей дилемме: «или элементарный электродинамический закон, выведенный из потенциального закона, не верен, или что в настоящем опыте не было разомкнутого тока». «На основании ряда многочисленных опытов, — писал он, — можно с полной достоверностью сказать, что в действительности не было замечено никакого отклонения замкнутого магнита под действием конца тока. Следовательно, выводы потенциальной теории не оправдываются опытом. Остается или принять выводы теории, не признающей электродинамических действий концов разомкнутых токов, или отказаться от мысли о возможности самого существования таких концов».

С целью решения этого вопроса Шиллер и предпринял вторую серию исследований. Он рассмотрел возможности следующего опыта.

Над одним из полюсов вертикально поставленного соленоида подвешен круглый конденсатор, могущий вращаться вокруг оси, совпадающей с осью соленоида. Обкладки конденсатора соединены проводом, направленным по оси вращения и замкнутым на достаточном удалении от полюсов соленоида. По проводу пропускается переменный ток, синфазный с током, текущим через соленоид.

О действии соленоида на конденсатор можно было сделать три предположения:

1) В случае справедливости потенциального закона для разомкнутых проводников соленоид не должен оказывать никакого электродинамического действия на вращающийся конденсатор.

2) Соленоид будет стремиться повернуть конденсатор около его оси, если разомкнутые токи подчиняются элементарному закону Ампера. Момент вращения должен быть равен по величине и обратен по знаку тому моменту, с которым действовал бы соленоид на ток смещения в диэлектрике между обкладками конденсатора.

3) Если ток смещения действительно существует, т. е. если изменение во времени поляризации эквивалентно в электродинамическом отношении некоторому току, идущему через диэлектрик, то для цепи с конденсатором потенциальный закон и закон Ампера будут тождественны.

Возможность первого предположения была решена рассмотренным выше экспериментом Шиллера. Решить путём непосредственного опыта вопрос о том, какое из двух последних предположений справедливо, оказалось очень трудным, так как многочисленные опыты показали невозможность обнаружить вращение конденсатора соленоидом. Поэтому Шиллер пошёл обратным путём, суть которого заключалась в следующем.

Если через M обозначить момент силы, действующей со стороны соленоида на элемент тока в цепи с конденсатором, то согласно Амперу при вращении конденсатора с угловой скоростью ω в цепи наводятся э. д. с. $\mathcal{E} = -M\omega$.

Предполагая, что ток смещения существует, отыщем выражение для момента силы, действующей со стороны соленоида, на диэлектрик; при этом ток смещения представим в виде элементов, перпендикулярных к обкладкам конденсатора.

Ось z направим по оси соленоида через центр конденсатора, а оси x и y расположим в плоскости конца соленоида, обращённого к конденсатору; через X и Y обозначим компоненты силы, действующей на элемент тока смещения Δz со стороны соленоида. Тогда момент M выразится так:

$$M = \sum (X_y - Y_x),$$

где суммирование распространено ко всем элементам тока (x и y — координаты суммируемых элементов).

Пользуясь законом Ампера, можно написать:

$$X = \left(\frac{\partial P}{\partial z} \Delta y - \frac{\partial P}{\partial y} \Delta z \right) \frac{\partial S}{S} i,$$

$$Y = \left(\frac{\partial P}{\partial x} \Delta z - \frac{\partial P}{\partial z} \Delta x \right) \frac{\partial S}{S} i,$$

где P — потенциал соленоида в центре элемента тока, S — площадь обкладки конденсатора, i — плотность тока.

Отсюда следует:

$$M = -\frac{i \Delta z}{S} \sum \left(y \frac{\partial P}{\partial y} - x \frac{\partial P}{\partial x} \right) dS$$

Мы опускаем довольно сложный расчёт величины M , проведённый Шиллером (он полностью приведён в его диссертации). Ему удалось получить выражения всех величин, которые определяют э. д. с., наведённую электромагнитом в разомкнутой цепи с вращающимся конденсатором. Теория показала, что при вращении конденсатора на нём образуется заряд, который удерживается в процессе вращения, а «с остановкой конденсатора, или уменьшением скорости вращения, всё электричество или часть его нейтрализуется через проводник».

Принципиальная схема установки, с помощью которой Шиллер проверял результаты теоретических расчётов, состояла в следующем (рис. 2). Между полюсами сильного электромагнита (aa) был укреплен круглый конденсатор c на металлической оси, проходящей внутри корпуса электромагнита. К этой оси прижаты пружины (bb), которые соединены проводом через гальванометр Γ . Конденсатор приводился во вращение со скоростью около 15 об/сек.

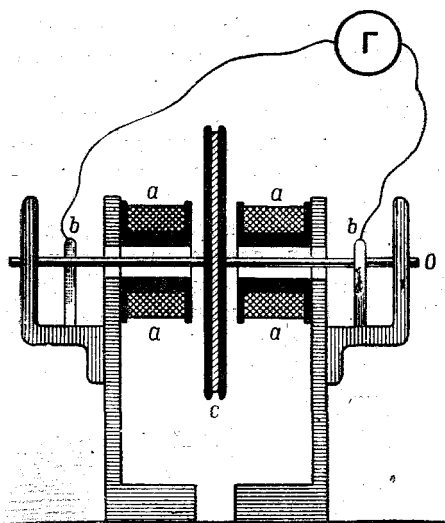


Рис. 2.

остаётся допустить, что в электродинамическом отношении нет концов тока и диэлектрики действуют, как проводники».

Исследование Н. Н. Шиллера имело большое принципиальное значение.

Это было первое, хотя и косвенное, доказательство реальности токов смещения. Оно нанесло сильный удар по теориям, базировавшимся на амперовской электродинамике, показало несостоятельность доктрины «*actio in distans*». Этим, естественно, в значительной степени укрепились позиции сторонников теории электромагнитного поля.

Значение глубокого исследования Н. Н. Шиллера было в своё время отмечено в литературе. Иван Иванович Боргман в своём двухтомном труде «Основания учения об электрических и магнитных явлениях»¹⁸ указывал, что опыты Н. Н. Шиллера явились первым подтверждением справедливости гениальной гипотезы Максвелла о существовании токов смещения. Пётр Алексеевич Зилов в работе «Опытное исследование диэлектрической поляризации в жидкостях»¹⁹

Чувствительность индикатора значительно превышала теоретически рассчитанную величину ожидавшейся э. д. с. (в предположении справедливости закона Ампера). Однако многочисленные тщательно проделанные опыты дали отрицательный результат. Это привело Шиллера к заключению, что диэлектрик, находящийся между пластинками конденсатора, участвует в электромагнитной индукции, замыкая цепь. Он писал:

«Наблюдения показали, что ожидаемых отклонений не существует, и что, следовательно, нет электродвижущей силы, предполагаемой законом Ампера. Стало быть,

писал: «Возникновение или вообще изменение поляризации равносильно току в диэлектрике; прямых наблюдений над этим состоянием диэлектрика до сих пор не было сделано. Тем не менее опыты Шиллера дают косвенное указание на то, что диэлектрики в момент развития в них поляризации обладают электромагнитными свойствами». Таким образом, для русских физиков опыты Шиллера были достаточно убедительным аргументом в пользу основного пункта теории Максвелла — гипотезы о существовании тока смещения.

Следует подчеркнуть, что прямое доказательство реальности токов смещения также принадлежит русской физике¹⁵. Известные классические опыты А. А. Эйхенвальда, результаты которых были опубликованы в 1904 г. в работе «О магнитном действии тел, движущихся в электростатическом поле», показали возможность непосредственного измерения магнитного поля токов смещения.

Обратимся теперь к другой замечательной работе Н. Н. Шиллера «Опытное исследование электрических колебаний», опубликованной в 1874 г.²⁰ Первая часть этой работы содержала убедительное экспериментальное доказательство справедливости известной формулы В. Томсона:

$$T \sim \sqrt{LC}.$$

Вторая часть «Опытных исследований» была посвящена решению вопроса, который имел принципиальное значение в физике того времени, является ли диэлектрическая постоянная действительно постоянной характеристикой вещества или она изменяется в зависимости от условий, в которых находится это вещество.

Вопрос этот решён Н. Н. Шиллером впервые.

В рассматриваемой работе он писал: «Определения времени колебания альтернирующих токов могут быть с успехом приложены к измерению диэлектрических постоянных для различных изолирующих тел. Подобные определения, насколько мне известно, не были ещё производимы при таком коротком времени заряда, какое имеет место при электрических колебаниях; кроме того, вообще немало важно исследовать, каким образом диэлектрическая поляризация происходит в такие чрезвычайно малые интервалы времени» (подчёркнуто мною. — В. Д.).

Применённый Шиллером для измерения диэлектрической проницаемости при коротких временах заряда оригинальный метод позволил получить первые в истории физики данные, приведённые в таблице на стр. 586.

Характерно, что эти данные мало отличаются от современных.

Попутно с определением зависимости ϵ от частоты электрических колебаний Шиллер заинтересовался вопросом зависимости этой величины от напряжённости электрического поля. Возможности экспериментальной установки позволяли варьировать напряжённость поля от единиц до сотен вольт. Тщательные опыты показали, что

Вещества	Диэлектрическая проницаемость	
	при $\tau = 6 \cdot 10^{-5} -$ $8 \cdot 10^{-5}$ сек	при $\tau =$ $= 0,025 - 0,2$ сек
Эбонит	2,21	2,76
Чистый каучук (бурый)	2,12	2,34
Вулканизированный каучук (серый)	2,69	2,94
Парафин прозрачный	1,68	1,92
» белый	1,85	2,47
Полубелое стекло	3,31	4,12
Белое зеркальное стекло	5,83	6,34

в пределах этих напряжённостей диэлектрическая проницаемость не изменяется.

Шиллер пошёл дальше по пути накопления опытных данных, подтверждающих справедливость теории Максвелла. В своей работе он пишет: «по электромагнитной теории света, предложенной Максвеллом, должно существовать некоторое соотношение между диэлектрическими постоянными и показателями преломления изоляторов, а именно, первые должны быть равны квадратам последних». С целью проверки этого соотношения Шиллер провёл параллельные измерения показателей преломления*) и диэлектрических проницаемостей нескольких веществ; результаты этих измерений показали справедливость знаменитого максвелловского соотношения.

Далее Шиллер исследовал один из важнейших пунктов теории электромагнитного поля, а именно, влияние среды на электромагнитную индукцию. С этой целью он заключал обмотки катушки Румкорфа в цилиндры из серы и наблюдал периоды колебаний во вторичной обмотке при наличии серы и без неё. Разницы не было обнаружено, и Шиллер осторожно заключил, что если влияние диэлектрической среды на электромагнитные колебания и имеет место, то оно лежит за пределами чувствительности применённого им метода.

Бесспорно, что в создании экспериментального фундамента максвелловской теории электромагнитного поля Шиллеру принадлежит выдающаяся роль.

К сожалению, в современной физической литературе имя Н. Н. Шиллера в связи с теорией электромагнитного поля даже не упоминается. Между тем работы русского учёного относятся к периоду, наиболее трудному для теории электромагнитного поля.

*) Для измерения показателей преломления Шиллер пользовался «наблюдением предельных углов полного внутреннего отражения».

4. ОТКРЫТИЕ ИНЕРЦИИ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВА»

Обратимся теперь к замечательному исследованию ученика А. Г. Столетова — Роберта Андреевича Колли.

Большая часть работ Колли была посвящена выяснению природы и закономерностей тока в электролитах. В 1872 г., за год до появления максвелловского «Трактата», Колли выдвинул следующую оригинальную идею²⁹.

Допустим, что через вертикальный столб электролита, например AgNO_3 , пропускается ток между одинаковыми электродами от какого-нибудь элемента. Если катод находится сверху, то катион Ag ($A \approx 108$) направится вверх, а анион NO_3 ($A \approx 62$) — вниз. Вследствие того, что катион тяжелее аниона, некоторая часть энергии источника тока должна тратиться на работу поднятия массы вещества, равной разности масс анионов и катионов. Если наш столб электролита перевернуть катодом вниз, работу произведёт уже сила тяжести, следствием чего должно быть увеличение силы тока в цепи или появление эквивалентной ей добавочной э. д. с. источника, однонаправленной с имеющейся. Получается, что при определённых условиях образуется, можно сказать, «гравитационная э. д. с.». (Такое устройство впоследствии вошло в физику под названием «гравитационного элемента».)

В статье 1875 г. «Исследование одного случая работы гальванического элемента»³⁰ Колли писал: «Первые мои попытки оправдать на опыте изложенные выше теоретические предположения, были сделаны мною над колоннами медного купороса.

Опыты не привели к ожидаемому результату, потому я о них ничего не печатал, хотя и сообщал изустно о моих исследованиях Любимову и Столетову и некоторым другим лицам, интересовавшимся моими работами. По некоторым личным обстоятельствам я должен был затем прекратить почти на два года всякие практические занятия в лаборатории».

В 1873 г. вышел «Трактат» Максвелла, в котором были высказаны те же мысли. Максвелл посвятил этому вопросу всего несколько строк. Он определил «гравитационную э. д. с.» (обозначим её через $\mathcal{E}_h$) для цинкового купороса, не принимая в расчёт перемещения кислотной группы. Полученная величина $\mathcal{E}_h$ привела Максвелла к весьма пессимистическому взгляду на возможность её опытного обнаружения.

Теория, развитая Колли³⁰, учитывала не только разность весов аниона и катиона, как это делал Максвелл, но и чисел переноса, от которых зависят пути, пройденные тем и другим ионом. Оказалось, что $\mathcal{E}_h$ представляет собой малую величину, постоянную для данного столба жидкости и не зависящую от силы тока. Однако, несмотря на малость величины $\mathcal{E}_h$ и на незначительное сопротивление столба жидкости, величина силы тока, вызванного этой э. д. с.,

как показал Колли, не лежала за пределами чувствительности имевшегося в его распоряжении гальванометра.

В 1874 г. Колли начал экспериментировать с солями серебра и серебряными электродами. Чрезвычайно тонкие опыты были проделаны тремя методами, однако положительный результат дал лишь следующий опыт. Ток i_h в трубке, наполненной электролитом, вызывался (далее уместно процитировать автора) «тем слабым током, который даёт сама трубка вследствие несовершенной одинаковости серебряных электродов или вследствие их поляризации. Назовём его I . Хотя вследствие тщательной очистки серебра электрода и удаления газов из жидкости этот ток был очень слаб, но к совершенному его уничтожению не было ни возможности, ни надобности. Напротив того, из него, как видно, можно было извлечь пользу, если только достигнуть того, чтобы этот ток был достаточно постоянен. Сила тока I не имеет (по теории) в данном случае значения; выше было доказано, что э. д. с. $\mathcal{E}_h$, а следовательно, и ток i_h от неё не зависят. Мы можем составить один неразветвлённый контур из гальванометра и трубки и менять в последней лишь направление тока относительно вертикала, т. е. заставляя его нисходить, то восходить по жидкости, поворачивая трубку то одним, то другим концом вверх и наблюдая на гальванометре разность токов

$$(I + i_h) - (I - i_h) = 2i_h.$$

Результаты опыта позволили Колли сделать следующие выводы:

1) обнаруживается разница между силой тока, восходящего и нисходящего по колонне электролита,

2) знак этой разницы именно такой, какой указывает теория, т. е. ток нисходящий сильнее восходящего для азотнокислого серебра,

3) наблюдаемая разница не более теоретической. Если бы она была более, то не могла бы зависеть единственно от причин, которые предвидит теория, и служила бы указанием других неизвестных причин».

В 1876 г. Колли опубликовал «Дополнение к статье „Исследование одного случая работы электрического тока“»³¹, в котором привёл результаты новых экспериментов, ещё раз подтвердивших справедливость приведённых выводов.

Добытый экспериментальный материал позволил Колли выступить в 1881 г. с замечательной статьёй «О существовании пондеро-электрокинетической части энергии электромагнитного поля»³².

В этой работе Колли изложил идеи Максвелла по поводу существования части энергии поля T_{me} , развил их и наметил пути реализации этих идей.

Предварительно напомним, что в то время совершенно не ясна была природа электрического тока в металлах (существование электронов было открыто более чем 20 лет спустя), не было правиль-

3. ИССЛЕДОВАНИЯ П. А. ЗИЛОВА ПО ВЫЯСНЕНИЮ РОЛИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СРЕДЫ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

К исследованиям Н. Н. Шиллера тесно примыкают исследования другого ученика А. Г. Столетова — Петра Алексеевича Зилова.

Напомним, что самой существенной стороной фарадей-максвелловской гипотезы о природе электромагнитных явлений было представление о близкодействии, о непрерывном участии промежуточной среды в процессах взаимодействия между наэлектризованными, намагниченными или обтекаемыми током телами. Обоснованию справедливости этих материалистических представлений была посвящена серия исследований П. А. Зилова (1875—1881).

Рассмотрим его магистерскую диссертацию «Опытное исследование диэлектрической поляризации в жидкостях»¹⁹. Уже во введении к работе П. Зилов пишет, что его исследование направлено на «доказательство, что во взаимодействии электрических масс окружающая среда принимает участие». В экспериментальной части рассматриваемого исследования П. Зилов решает задачи: а) определение диэлектрических постоянных жидких изоляторов; б) проверка максвелловского соотношения $\epsilon = n^2$.

До П. Зилова только Фарадей производил качественные опыты с жидкими диэлектриками, в результате которых было установлено, что диэлектрические постоянные жидкостей превышают таковые же для воздуха. Количественных данных в этой области физика не имела. А они были необходимы прежде всего для опытной проверки максвелловского соотношения (напомним, что Шиллер проделал это только для твердых диэлектриков)*).

Жидкости оказались особенно подходящим материалом для решения поставленной задачи по следующим соображениям. Во-первых, они более всего удовлетворяли условиям, для которых была разработана теория поляризации (однородность диэлектрика); во-вторых, прозрачность жидкостей облегчала возможность точного измерения их показателя преломления одновременно с измерением диэлектрических постоянных. «Эти соображения, — пишет Зилов, — позволили надеяться, что опыты с жидкостями лучше оправдают соотношение между диэлектрической постоянной и показателем преломления, указанные Максвеллом».

Интересно, что в первой части работы, посвященной теории диэлектрической поляризации, Зилов пишет, что «действие электромагнитных сил распространяется точно так же, как световые колебания в прозрачной среде. Что касается длины электрических волн, то надо думать, что она бесконечно велика сравнительно с длиной световых волн».

*) Проверкой справедливости максвелловского соотношения для газов занимался в этот период Л. Больцман.

Мы имеем в данном случае прекрасный исторический пример того, как убеждение часто опережает доказательство. Напомним, что это было сказано более чем за 10 лет до опытов Герца.

Замечательно, что через всю работу Зилова красной нитью проходит глубокая уверенность в справедливости теории Максвелла.

Характерна трактовка Зиловым вопроса о роли среды в электромагнитных процессах. Приведём следующее интересное высказывание:

«Для распространения или передачи чего-нибудь должна существовать посредствующая среда; поэтому в теории света допускается существование эфира. Для передачи действия электрических сил мы должны тоже принять существование некоторой среды. Какова же эта среда? Тот же световой эфир или какая-нибудь другая среда? С одной стороны, понятно, как выгодно для всякой новой теории, если можно обойтись без новой гипотезы. С другой стороны, и давно известные факты не противоречат первому из этих предположений: действие электромагнитных сил распространяется в безвоздушном пространстве, электрический ток действует на световой эфир, вращая плоскость поляризации светового луча. Поэтому попробуем допустить, что среда, служащая для распространения действия электромагнитных сил, есть световой эфир. Какие же следствия вытекают из этого допущения:

1. $\sqrt{\frac{v^2}{\epsilon}}$ должен быть равен скорости распространения света в том веществе, которое проникает эфир и в котором делается электромагнитный опыт. Для воздуха $\epsilon = 1$ и $v = c$, т. е. электромагнитная единица электрической массы относится к электростатической единице как скорость распространения света в воздухе.

2. $\epsilon = n^2$ — квадратный корень из диэлектрической постоянной изолятора равен его показателю преломления для лучей бесконечно длинной волны».

Зилов далее утверждает: «наши опыты вполне оправдывают эти заключения».

Для определения диэлектрической проницаемости жидкостей Зилов пользовался двумя методами: 1) сравнением ёмкостей конденсатора без диэлектрика и с диэлектриком; 2) измерением силы взаимодействия двух проводников в воздухе и в диэлектрике. Теорию последнего метода Зилов развил независимо от Максвелла в 1875 г.²² Эта теория даёт следующее выражение для диэлектрической проницаемости: $\epsilon = \frac{f}{f_0}$, где f — сила взаимодействия двух проводников, наэлектризованных до данной разности потенциалов и окружённых диэлектриком; f_0 — та же сила в воздухе.

Для проведения экспериментов по последнему методу Зилов построил оригинальный электрометр *). Полученные Зиловым резуль-

*) Этот электрометр описан в «Курсе физики» Хвольсона²¹.

таты первых в истории физики количественных измерений диэлектрической проницаемости жидкостей представлены в таблице.

Вещество	Диэлектрическая проницаемость ϵ		$\sqrt{\epsilon}$		n
	I метод	II метод	I метод	II метод	
Скипидар I	2,153	2,173	1,468	1,473	1,458
» II	—	2,250	—	1,507	1,453
Керосин I	2,071	—	1,439	—	1,422
» II	—	2,037	—	1,428	1,435
Бензол	2,198	—	1,483	—	1,486

Показатель преломления Зиллов определял по способу наименьшего отклонения. Для бензола он пользовался наблюдением над двумя фраунгоферовыми линиями солнечного спектра, для других веществ — линиями натрия и лития.

В «Опытных исследованиях» Зиллов ещё раз подтвердил вывод Шиллера о том, что диэлектрическая проницаемость не зависит от напряжённости поля.

Большой исторический интерес имеет работа П. А. Зилова «Влияние среды на электродинамическую индукцию»²³, проделанная по предложению А. Г. Столетова²⁴).

Вопрос о влиянии среды на электродинамическую индукцию был поставлен Фарадеем. В четырнадцатой серии «Экспериментальных исследований» Фарадей описывает опыты, с помощью которых он пытался определить, оказывает ли промежуточное вещество какое-нибудь влияние на характер или интенсивность явлений электромагнитной индукции. Однако эти опыты не дали положительного результата. С тех пор поставленный Фарадеем вопрос постоянно интересовал учёных. В 1870 г. итальянский физик Блазерна нашёл, что скорость распространения индукции якобы равна 270 м/сек для воздуха, 61 м/сек для стекла и т. д. На этом основании была подвергнута сомнению теория Максвелла. Но Гельмгольц в 1871 г. проделал опыт, показавший, что скорость распространения электромагнитных действий не может быть меньше 314 400 м/сек²¹. Полученный Гельмгольцем результат показал ошибочность опытов Блазерна. Шиллер, как мы уже указали в 1874 г., установил, что диэлектрик, поставленный между первичной и вторичной обмотками румкорфовой катушки, не оказывает влияния на электромагнитные

*) Почти одновременно с П. Зилловым эту же тему разрабатывал в Петербургском университете И. И. Боргман. По поводу приоритета впоследствии имела место полемика между московской и петербургской школами физиков [см. 18].

процессы. Более обстоятельные опыты в этом направлении, проведённые Зиловым, подтвердили эти результаты.

В указанной работе Зилов теоретически рассматривает вопрос об отношении промежуточных сред с различными свойствами к явлению индукции. Он пишет, что отрицательный результат опытов Шиллера и других учёных «находит оправдание в самой теории. Действительно, легко доказать, что на электродинамическую индукцию может оказывать влияние только такая среда, которая способна намагничиваться», и далее показывает, «что магнитные среды влияют на электродинамическую индукцию, подобно тому как диэлектрические среды влияют на электростатическую».

Определение «функции намагничивания» жидкостей k и изучение её зависимости от напряжённости магнитного поля послужило предметом последующих экспериментов Зилова, обобщённых в его докторской диссертации «Опытное исследование магнитной поляризации в жидкостях»²⁵. Мы не будем останавливаться на её анализе. Заметим лишь, что эта фундаментальная работа характеризует Зилова как тонкого экспериментатора. Постановка и обработка опытов безупречны; видны характерные черты столетовского стиля: глубокая разработка идеи, надёжность результатов, тщательность отделки.

Зилову удалось измерить величину k для шестихлористого железа; было получено: $k=0,00008$. Впоследствии И. И. Боргман²⁶ нашёл для того же самого коэффициента значения: $k=0,00005$ и $0,00004$. Зилов заинтересовался этой разницей в значениях k и поставил в 1879 г. эксперименты, с целью проверки зависимости k от «намагничивающей силы»²⁷. Тщательно проделанные опыты показали, что k является функцией «намагничивающей силы, имеющей максимум (0,000179) при намагничивающей силе $R=2,15$, если за единицу этой силы принять горизонтальную составляющую земного магнетизма». Этот новый для того времени результат Зилов вторично проверил в 1880 г. и опубликовал результаты в заметке «Намагничивание жидкостей»²⁸. Приведём отсюда только конечный вывод:

«Коэффициент намагничивания раствора шестихлористого железа не постоянен, но есть функция намагничивающей силы. С постоянным возрастанием намагничивающей силы коэффициент намагничивания сперва тоже возрастёт; при известном значении намагничивающей силы он достигает максимума и затем убывает сперва быстро, потом медленно».

Свою работу Зилов проводил под руководством Столетова; она явилась естественным продолжением знаменитого исследования Столетова «О функции намагничивания мягкого железа». Полученный Зиловым результат нужно рассматривать как подтверждение и развитие основного вывода столетовского исследования, а именно, что «функция намагничивания» (или по нашей терминологии — магнитная восприимчивость) не является величиной постоянной, а зависит от напряжённости поля.

ной теории электрической диссоциации (она появилась в 1887 г.). Тем более примечательно, что Колли сумел найти правильный путь решения поставленной Максвеллом проблемы, нашёл правильное представление о природе электрического тока. Убеждённый в применимости теории электромагнитного поля ко всем материальным средам, Колли обратил внимание на тот факт, что Максвелл при попытках обнаружить существование T_{me} экспериментировал только с металлами и не затронул электролитов, ни словом не обмолвившись даже о возможности опытов с ними. Развивая идею Максвелла, Колли писал: «В этих телах (электролитах) то, что мы называем электричеством, может двигаться не иначе, как вместе с материальными частицами тела, и в этом заключается принципиальное различие между электролитами и металлическими проводниками, над которыми только и экспериментировал Максвелл».

Отсюда, собственно, и возникла у Колли мысль о возможности открыть существование T_{me} , тем более, что «гравитационный элемент» убедил его в правильности представления о токе в электролитах как о поступательном движении в противоположных направлениях ионов с разными массами*). «Если мы, — писал Колли³², — с помощью тока, сообщим некоторую скорость иону..., то он в момент прекращения тока вследствие инерции должен передать своё движение всему проводнику, предполагая последний достаточно подвижным; явится, следовательно, некоторая пондеромоторная сила, именно сила Y_{me} . Во время установления тока явится такая же сила, но обратного знака. Если мы, напротив, будем приводить проводник из состояния покоя в движение с определённым ускорением, то тот же ион вследствие инерции должен несколько отстать в движении от общей массы проводника; при замедлении же, по той же самой причине, он должен опережать прочую массу. Но движение иона относительно прочей массы жидкости и есть именно явление, характеризующее существование в электролите электрического тока. Электродвижущая сила тока, являющегося при ускорении и замедлении движения проводника, есть максвелловская сила Y_{me} ».

В работе³³ Колли изложил два возможных метода для определения T_{me} : 1) «длинную трубку с электролитом нужно навить на обод колеса, которое приводить в движение и останавливать. Электроды, помещённые по концам трубки, при этом соединены с гальванометром»; 2) «трубка неподвижна, но жидкость приводится в движение напором нового количества жидкости, вытекающей из резервуара, где господствует сильное давление». При этом он дал теорию методов и указал оптимальные условия опытов.

*) Это очень интересный исторический факт: в своих исследованиях Колли пользовался в качестве рабочей гипотезы представлением о природе электрического тока в электролитах, которое было подтверждено опытами и вошло в науку гораздо позднее.

Р. Колли предполагал развернуть свои исследования. В одной из своих последних работ³⁴ он писал: «инерция ионов, некоторые действия которой мне удалось обнаружить..., должна оказывать влияние на токи, быстро меняющие знак, и следовательно, можно ожидать, что исследование этого влияния в случае успеха позволит сделать кое-какие заключения, касающиеся некоторых важных свойств электролитов». Ранняя смерть учёного помешала осуществлению его планов. К сожалению, его замечательные исследования были оставлены без внимания в царской России. В своё время подхватил и развил их голландский физик Де Кудр.

По предложенному Колли первому методу он проделал опыты в 1893—1895 гг.³⁵ Горизонтальную прямую трубку с раствором он заставлял вращаться вокруг вертикальной оси. Работа против центробежной силы действительно вызывала появление обратной э. д. с., величину которой Де Кудр мог измерить довольно точно.

Кроме того, голландский учёный повторил опыты Р. А. Колли по определению «гравитационной» э. д. с. с растворами KCl , $NaCl$, $CdCl$ и $BaCl$. Он уточнил результаты Колли, получив для «гравитационной» э. д. с. величины порядка 0,02—0,2 мкв на 1 м разности высот.

Напомним, что первые опыты по обнаружению инерции электронов были проведены Н. Д. Папалекси и Л. И. Мандельштамом в 1911 г.^{33а *}

После них серию аналогичных опытов по обнаружению инертности электронов, а затем определению массы электрона провели Толмен и его сотрудники. Эти опыты легли в экспериментальный фундамент теории электронов.

Рассмотренное исследование Р. А. Колли служит весьма характерным примером творческого отношения русских учёных к передовым материалистическим идеям теории электромагнитного поля. Оно должно войти в историю отечественной физики в качестве открытия большого принципиального значения и отмечено как бесспорное достояние русской науки.

5. ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЕДИНИЦЫ ЗАРЯДА К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ. ПРОПАГАНДА ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Один из аргументов, опираясь на которые Максвелл пришёл к заключению, что «свет есть не что иное, как электромагнитное колебание», явился факт совпадения величины отношения электростатической и электромагнитной единицы заряда к скорости света. Вебер и Кольрауш, впервые определившие опытным путём отношение электростатической и электромагнитной единиц заряда, получили

*) К сожалению, эти опыты не были опубликованы в печати.

величину 193 088 миль в секунду. Физо для скорости света нашёл величину 193 118 миль в секунду. Максвелл привёл в «Трактате» именно эти данные.

Естественно, что огромное принципиальное значение факта совпадения указанных величин привлекло внимание учёных. Проверка показала, что в действительности совпадение между ними далеко не столь блестяще, как это принял Максвелл. В связи с этим встал вопрос о точном измерении электростатических и электромагнитных констант с целью проверки указанного отношения. Кроме того, необходимо было упорядочить вопрос о системах единиц. Напомним, что в рассматриваемую эпоху существовал полнейший хаос в выборе электрических и магнитных единиц измерения.

В этой важной работе активное участие приняли русские физики. На первом месте здесь следует, несомненно, поставить А. Г. Столетова.

В сентябре 1881 г., будучи на конгрессе в Париже, Столетов сделал сообщение во Французском физическом обществе «Об одном методе определения отношения электромагнитных и электростатических единиц (v Максвелла)», опубликованное в этом же году в печати¹², в котором предложил метод определения v , вошедший в физику под названием метода постоянного отклонения гальванометра.

Столетов не был удовлетворён точностью своих измерений*). К сожалению, осуществить намеченную в рассматриваемой работе программу более точного определения v Столетову не удалось. Помешали этому отсутствие точного эталона ома и несовершенство отечественной измерительной техники, связанное с общей технической отсталостью царской России.

Интересный метод измерения знаменитого отношения предложил Р. А. Колли в 1885 г. в работе «О нескольких новых методах изучения электрических колебаний и о некоторых их приложениях»³⁴. Это метод колебательного разряда, основанный на применении формулы Томсона $T = 2\pi \sqrt{LC}$. Если колебательный контур имеет ёмкость C_m и самоиндукцию L_m , выраженные в электромагнитной системе единиц, и ёмкость в электростатической системе будет равна C_e , то $C_m = \frac{C_e}{v^2}$; отсюда

$$v = \frac{2\pi}{T} \sqrt{L_m C_e}.$$

Следовательно, измеряя период электрических колебаний и величину L_m , можно найти необходимое нам v (C_e можно вычислить или сравнить с известной нам ёмкостью). Колли получал весьма медленные электрические колебания, увеличивая C и L . Для измерения

*) А. Столетов получил значение v в пределах $2,98 - 3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

периода колебаний он впервые в истории физики выдвинул идею осциллографа и осуществил её*).

Пользуясь указанным способом, Р. Колли провёл многочисленные измерения величины v . В качестве наиболее надёжного значения он дал $v = 3,015 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Большой исторический интерес имеют публичные выступления И. И. Боргмана, посвящённые теории Максвелла. В них особенно отчётливо выражено отношение русских учёных к новым физическим воззрениям. Эти выступления принадлежат к числу ярких выражений материалистических традиций русской науки.

Обратимся к речи «Электромагнитная теория света»⁸, произнесённой И. И. Боргманом на съезде русских врачей и естествоиспытателей 17 декабря 1881 года. В ней учёный рисует картину развития воззрений на природу света, показывает ограниченность теории Френеля и трудности, которые физики не сумели преодолеть в рамках этой теории. О теории Максвелла Боргман говорит как о новом этапе в развитии взглядов на природу световых явлений, подчеркивает её прогрессивное значение.

Характерно следующее высказывание Боргмана:

«Её (теории Максвелла) значение в том, что она объединяет два рода явлений, свет и электричество, и таким образом даёт нам прочное звено в общей цепи, связывающей все явления природы, влекущей за собой признание единства физических сил».

Замечательно то, что, говоря об экспериментальных подтверждениях теории Максвелла, Боргман ссылается исключительно на работы русских учёных. Он указывает на опыты Зилова и Шиллера, которые убедительно продемонстрировали роль среды в электродинамических взаимодействиях, объясняет результаты своих опытов по влиянию намагничивающейся среды на электромагнитную индукцию и заключает: «принимая во внимание всё сказанное, вряд ли может явиться в настоящее время сомнение, что при распространении электрических магнитных или вообще электромагнитных сил в окружающей источник этих сил среде происходит ряд изменений». Говоря о токе смещения, Боргман опять же ссылается на опыты Шиллера, показавшие справедливость гениальной гипотезы Максвелла.

В своей речи Боргман подчеркивает плодотворность новой теории. В качестве подтверждающего эту мысль примера он опять же приводит работы русских учёных. Уместно указать на эти работы. В 1874 г. электромагнитная теория света натолкнула Н. Г. Егорова на изобретение своеобразного фотоэлемента.

*) Р. Колли назвал свой прибор «осциллометром».

Заметим что возникновение идеи осциллографа относили к 1891 г.; автором её считался Блондель.

К сожалению, мы не имеем возможности остановиться на рассмотрении оригинальной конструкции первого осциллографа, построенного русским учёным; это увело бы нас в сторону от рассматриваемого вопроса.

Ещё в 1839 г. Эдмонд Беккерель исследовал влияние света на электрический ток в электролитах. Ему удалось обнаружить, что если из двух одинаковых чувствительных к свету пластинок из химически чистого серебра, погружённых в слабый раствор (2 %) серной кислоты, одна находится в темноте, а другая освещается ультрафиолетовыми лучами, то в цепи, соединяющей эти пластинки, появляется электрический ток.

Беккерель не сумел ни правильно истолковать открытое явление, ни найти ему практическое применение. Егоров же, руководствуясь электромагнитной теорией света, понял существо этого явления и нашёл ему практическое применение. Он построил прибор, являющийся прототипом современного фотоэлемента, названный им «электрическим фотометром»³⁵.

Электромагнитная теория света натолкнула В. В. Лермантова на исследование фотохимических процессов. Русский учёный высказал правильные для того времени заключения о механизме процессов, происходящих в веществе при падении на него лучей света³⁶.

«Электромагнитная теория света, — говорил И. И. Боргман, — имеет глубокое философское значение при распознавании явлений природы».

Русские учёные предвидели большое будущее новой теории световых явлений. Это отчётливо выразил И. И. Боргман в рассматриваемой статье: «Но кончается ли только тем приложение этой теории, что сделано теперь? Конечно, нет. Ещё трудно и предвидеть, какие выводы может дать нам эта теория. Вспомним, что её существование слишком ещё кратковременно. Всего в 1873 г. её основания развиты Максвеллом. И в такой короткий срок мы видим уже столько сделанных из неё выводов».

Выраженный здесь оптимизм по отношению к теории Максвелла имел глубокие основания. Новая теория своими методологическими основами отвечала материалистическому духу русской науки. Основания этому оптимизму были заложены большим экспериментальным материалом, уже добытым русскими физиками.

Характерно, что в большинстве своих работ в конце XIX в. Боргман прямо или косвенно подчёркивает прогрессивность фарадей-максвелловских воззрений, противопоставляет их воззрениям сторонников дальнего действия. В качестве примера приведём его обширные исследования «Влияние среды на электродинамические явления» (1877 г.)³⁷, «О нагревании железа при прерывчатом намагничении»³⁸.

Говоря о роли И. И. Боргмана в утверждении теории Максвелла, следует отметить его двухтомный труд «Основания учения об электрических и магнитных явлениях». Это был лучший в то время в мировой литературе учебник по теории электромагнетизма с хорошим изложением основ максвелловской теории, с убедительной демонстрацией её преимуществ перед другими теориями, с ярко выраженными материалистическими тенденциями. По книге И. И. Боргмана училось целое поколение русских физиков.

ВЫВОДЫ

Теория электромагнитного поля более чем за 10 лет до опытов Герца была единодушно принята русскими физиками как прогрессивная и плодотворная теория.

Трудами русских физиков до опытов Герца были экспериментально доказаны следующие положения теории электромагнитного поля;

а) что среда, окружающая взаимодействующие, наэлектризованные, намагниченные или обтекаемые током тела, принимает неперенное участие в качестве передатчика взаимодействий, что характер последних существенно зависит от свойств среды в соответствии с выводами теории;

б) что не существует «концов тока», а через диэлектрик проходит ток смещения; в результате все токи оказываются замкнутыми;

в) что имеет место равенство $\epsilon = n^2$ для твердых и жидких диэлектриков;

г) что электрические заряды обладают инерцией.

Таким образом, русской физике принадлежит честь создания значительной части экспериментальной базы теории электромагнитного поля. Это положение укрепляется замечательными результатами, добытыми в этой области русской физикой после опытов Герца. Освещение этих результатов требует специальной работы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Ломоносов, Собрание соч., т. 2, М.—Л., 1951.
2. Б. Н. Меншуткин, Труды Ломоносова по физике и химии, М.—Л., Изд. АН СССР, 1936.
3. Л. Эйлер, Письма о разных физических и философических материях, писанные к некоторой немецкой принцессе, ч. 1, Спб., 1768.
4. П. С. Кудрявцев, История физики, т. 1, 1948.
5. М. Faraday, Experiment. Research in Electricity, т. III, 1855.
- 5а. J. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, т. I, 1873.
6. В. Брэгг, История электромагнетизма, М., Гостехиздат, 1947.
7. J. Maxwell, Phil. Trans. 155, 459 (1865).
8. И. И. Боргман, Электромагнитная теория света Максвелла, М., 1881.
9. Розенбергер, История физики, ч. III, в. 1, 1931.
10. G. Airy, Phil. Mag. 28, 532 (1846).
11. «Из предистории радио», сб. под ред. С. М. Рытова, Изд. АН СССР, 1949.
12. J. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, т. II, 1904.
13. «Протоколы 8-го заседания физич. отд. Русского физ.-хим. об-ва», ЖРФХО 10, в. 9, 1878.
14. «Речи и протоколы VI съезда русских естествоиспытателей и врачей в Петербурге», Спб., 1880.
15. «Очерки по истории физики в России», 1949.
16. Н. Н. Шиллер, Киевские университетские известия, №№ 2, 3 (1876).
17. H. Helmholtz, Journ. f. Math. (Crelle) 78, 202 (1873).
18. И. И. Боргман, Основания учения об электрических и магнитных явлениях, т. II, 1895.
19. П. А. Зилов, Опытное исследование диэлектрической поляризации в жидкостях, М., 1877.

20. Н. Н. Шиллер, Математический сборник, 1874; Pogg. Ann. **152**, 535 (1874).
 21. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. 4, 1923.
 22. П. А. Зилов, Pogg. Ann. **156**, 390 (1875).
 23. П. А. Зилов, ЖРФХО **9**, в. 8 (1877); **10**, в. 1 (1878).
 24. Н. Helmholtz, Wissenschaftl. Abh. **1** (1882).
 25. П. А. Зилов, Опытное исследование магнитной поляризации в жидкостях, М., 1880.
 26. И. И. Боргман, ЖРФХО **10**, в. 6 (1878).
 27. П. А. Зилов, Bull. Soc. imp. nat. de Moscou **8**, 398 (1879).
 28. П. А. Зилов, ЖРФХО **12**, в. 5 (1880).
 29. Р. А. Колли, ЖРФХО **4**, в. 4 (1872).
 30. Р. А. Колли, ЖРФХО **7**, в. 3 (1875).
 31. Р. А. Колли, ЖРФХО **8**, в. 4 (1876); Pogg. Ann. **157**, 570 (1876).
 32. Р. А. Колли, ЖРФХО **13**, в. 3 (1881).
 33. Th. Des Coudres, Wied. Ann. **46**, 292 (1892); **49**, 284 (1893); **55**, 213 (1895).
 - 33а. Н. Д. Папалекси, Собрание трудов, М.—Л., Изд. АН СССР, 1948.
 34. Р. А. Колли, О нескольких новых методах изучения электрических колебаний, Казань, 1885; Wied. Ann. **28**, 1 (1886).
 35. Н. Г. Егоров, ЖРФХО **9**, в. 2 (1877).
 36. В. В. Лермантов, ЖРФХО **9**, в. 7 (1877).
 37. И. И. Боргман, ЖРФХО **9**, в. 7 (1877).
 38. И. И. Боргман, ЖРФХО **14**, в. 3 (1882).
-