

УДК 537

**Малыгин В.М.**

## Развитие физических представлений об электродинамике движущихся тел: эксперименты и трудности на пути создания теории

Малыгин Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, начальник лаборатории отдела метрологии и измерительной техники НИИ электромеханики (ОАО НИИЭМ, г. Истра, Московская область)

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-6095-5568>

E-mail: [vyacheslav-m-malygin@j-spacetime.com](mailto:vyacheslav-m-malygin@j-spacetime.com); [malygin.viach@yandex.ru](mailto:malygin.viach@yandex.ru)

Показано, что результаты экспериментов в области электромеханики допускают разные объяснения возникновения магнитного поля движущихся тел и его относительности. Что требует при решении системы дифференциальных уравнений Максвелла-Лоренца большее внимание уделять начальным условиям, определяемым не математической формалистикой, а конкретными условиями развивающегося во времени и пространстве окружающего нас физического мира.

**Ключевые слова:** электродинамика движущихся тел; электромагнитное поле; принцип относительности; уравнения Максвелла-Лоренца.

### Введение

В 2020 г. исполняется двести лет со дня открытия Эрстедом связи электрических и магнитных явлений, после чего началось бурное развитие электродинамики. В том же году Ампер, исходя из результатов своих экспериментов, заложил теоретические основы электродинамики. А десятью годами позже Фарадей открыл закон электромагнитной индукции и выдвинул концепцию близкодействия, то есть взаимодействия с помощью полей. Начался «золотой век» в развитии электродинамики, вершиной которого была система фундаментальных уравнений Максвелла и соединение ее с электронной теорией Лоренца<sup>1</sup>, чем физики пользуются и сейчас, хотя и с некоторыми ограничениями области применения (не затрагивая микромир элементарных частиц и движение тел со скоростями, близкими к скорости света).

Электродинамика изучает очень большой круг физических явлений, и здесь мы сосредоточим внимание на электродинамике движущихся тел, могущих являться источниками макроскопических электромагнитных полей (с учетом содержащихся в них избыточных электрических зарядов одного знака или (и) движущихся направленно друг относительно друга зарядов разного знака). Поля эти не меняются во времени (в системе отсчета движущегося тела), а тела движутся в однородном и изотропном пространстве с постоянной скоростью  $v$ , существенно меньшей скорости света  $c$ , не излучая электромагнитных волн. Это область электромеханики, где в большинстве практически важных случаев эти условия выполняются и можно пренебречь безвозвратным электромагнитным излучением в окружающее пространство. Теоретические основы электромеханики были заложены (исходя из электродинамики Максвелла) в работах Герца и Лоренца в конце XIX в.

Но уже в начале XX в. физика существенно продвинулась вперед в понимании законов природы, появилась теория относительности Эйнштейна и квантовая механика, где сейчас и проводятся наибо-

<sup>1</sup> Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. С. 531.

лее интенсивные исследования. Однако это не привело к созданию единой теории поля, к объединению понятий поля (где заряды это лишь узловые точки поля) и заряда (где источники поля это заряды). Так как теория относительности на фундаментальном уровне не совместима с квантовой механикой<sup>1</sup>, а объединяющие их теории пока остаются лишь гипотезами, не поддающимися проверке во время наблюдений за явлениями природы и при проводимых научным сообществом экспериментах.

По-видимому, для описания физической реальности все же нужны и волны, и частицы<sup>2</sup>. Как в уравнениях Максвелла, куда, кроме электромагнитного поля, входит еще одна независимая величина в виде плотности электрического тока<sup>3</sup>. Поэтому представляет интерес снова вернуться к системе уравнений Максвелла и электронной теории Лоренца. При этом более внимательно рассмотреть использование в них принципа относительности при движении частиц (зарядов) и делая упор на развитие физических представлений о математически описываемых законах природы, полученных на основе обобщения результатов экспериментов и наблюдений. Сделаем это на конкретных примерах опытов, проведенных на рубеже XIX и XX вв. и послуживших основой для создания теории электромеханических явлений.

Важность физического понимания законов природы подчеркнута, например, в курсе лекций по физике Фейнмана<sup>4</sup>, но с сожалением отмечено, что нам в основном приходится пользоваться абстрактными, формальными математическими представлениями о поле (и заряде тоже). Также и в современных курсах теоретических основ электротехники трудно бывает отделить математические методы от описания сущности электромагнитных явлений<sup>5</sup>.

Еще Ампер отмечал, что формулы, математические зависимости, полученные на основе экспериментов, оставаясь неизменными, впоследствии могут найти другое физическое объяснение<sup>6</sup>. Разные, в чем-то противоречащие друг другу объяснения приводят к парадоксам, роль которых в развитии физики подчеркнута в лекциях Мандельштама. Примеры некоторых парадоксов можно встретить и в курсе лекций Фейнмана. И, наконец, приведем слова Эйнштейна:

«Единственное отличие физических теорий от математических построений заключается в следующем. Физическая теория должна давать полное и воспроизводимое соответствие между описанной в определенных терминах реальностью и непосредственными чувственными восприятиями. Вопрос о том, как установить это соответствие, может решаться только интуитивно и не может быть выражен в рамках логически сформулированной теории»<sup>7</sup>.

По большому счету цель физики на ее самом фундаментальном уровне заключается не только в том, чтобы описать мир, но и объяснить, почему он таков, как есть<sup>8</sup>, хотя до этого еще далеко.

Здесь мы исходим из того, что физическое понимание (достигнутое хотя бы в частных вопросах и на примерах аналогий) приводит к более глубокому познанию законов природы и способствует процессу обучения, передачи последующим поколениям накопленных человечеством знаний. Роль его также важна в понимании и сохранении научного наследия известных ученых, внесших существенный вклад в развитие электродинамики<sup>9</sup>, что мы попытаемся продемонстрировать ниже на примере возникновения и развития электродинамики движущихся тел.

В дальнейших рассуждениях будем опираться на основные, фундаментальные законы физики: закон сохранения энергии (всех ее видов с учетом перехода из одной формы в другую), закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса, включая импульс не только тела (вещества), но и связанного с ним макроскопического электромагнитного поля за пределами тела. А так как речь пойдет об электродинамике движущихся тел, то это неизбежно приводит нас к необходимости внимательнее отнестись к пониманию самого определения систем отсчета, использованию этого понятия в конкретных условиях и к восприятию движения из разных систем отсчета.

Хотя мы будем минимально использовать математический аппарат, читателям все же потребуется знание математического языка (без которого невозможно изложение и понимание физических

<sup>1</sup> Грин Б. Элегантная вселенная: Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. С. 63.

<sup>2</sup> Клайн М. Математика. Поиск истины. М.: Мир, 1988. С. 221.

<sup>3</sup> Эйнштейн А. Сущность теории относительности. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. С. 39.

<sup>4</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. Электричество и магнетизм. М.: Едиториал УРСС, 2004. С. 28.

<sup>5</sup> Негушил А.В. Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники // Электричество. 1992. № 4. С.1.

<sup>6</sup> Ампер А.-М. Электродинамика. М.: Наука. Изд-во АН СССР, 1954. С. 12.

<sup>7</sup> Эйнштейн А. Указ. соч. С. 146.

<sup>8</sup> Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: Едиториал УРСС, 2004. С. 170.

<sup>9</sup> Малыгин В.М. Силы магнитного взаимодействия проводников с токами: особенности формулы Ампера и третий закон Ньютона // Пространство и Время. 2016. № 3-4. С. 86–92.

законов) в объеме, необходимом для понимания основных положений и идей в публикациях, на которые сделаны ссылки в тексте. Это дифференциальное исчисление векторных полей, интегральное исчисление векторов<sup>1</sup> и общие правила решения дифференциальных уравнений. Много ссылок на других авторов сделано потому, что в статье рассмотрен под общим углом зрения широкий круг вопросов, с разной глубиной (и в разных системах единиц) затронутых различными авторами, на работы которых мы будем опираться. Что позволит нам не повторять приведенные там рассуждения и математические выкладки, а сопоставлять выводы, тем самым сократив изложение материала до объема статьи.

### Системы отсчета и законы сохранения

Когда речь заходит о движении, то появляется понятие скорости перемещения тел (и переноса энергии) в пространстве за единицу времени, так как все физические процессы развиваются в пространстве и во времени. Значение скорости тела зависит от того, в какой системе отсчета производится измерение. Удачный выбор системы отсчета, не влияя на законы природы (*явление природы, как и законы природы, не может зависеть от выбора системы отсчета*<sup>2</sup>), часто позволяет упростить их математическое описание. Например, теории Птолемея и Коперника дают одинаковый результат при расчетах движения планет, но победила теория Коперника из-за простоты и математической красоты<sup>3</sup>, а с физической точки зрения еще и потому, что в ней система отсчета связана с центром масс Солнечной системы, что позволяет глубже понять физику закона движения планет.

Частным случаем систем отсчета являются инерциальные системы отсчета (ИСО), это *жесткие тела со связанными с ними координатной системой и часами*, в них проще математическое описание физического явления. Математической характеристикой ИСО служит утверждение, что в них уравнения механики Ньютона инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея. А физическое утверждение заключается в том, что в ИСО при одинаковых начальных условиях все механические явления протекают одинаково<sup>4</sup>. Оба утверждения правильны, но, как видим, разница есть, хотя ее трудно сформулировать. Часто в курсах физики рассматривают ситуацию, когда наблюдатель находится в одной ИСО, а наблюдаемое физическое явление происходит во второй ИСО, которая движется с постоянной скоростью относительно первой. И требуется пересчет значения скорости, измеренной наблюдателем.

Однако не нужно преувеличивать роль этой скорости с точки зрения физического понимания наблюдаемого явления, к которому она не имеет непосредственного отношения. ИСО по существу изолированы друг от друга, это замкнутые системы, и события в одной из них не влияют на события в другой. Так как по определению система отсчета, служащая для определения координат и времени события, *является инерциальной, если в ней соблюдается закон инерции – изолированное тело (тело, не находящееся под действием сил) движется равномерно и прямолинейно*. А изолированность гарантирована, если все другие тела находятся достаточно далеко<sup>5</sup>, при этом ограничивающая ИСО поверхность настолько удалена, что на ней поле равно нулю<sup>6</sup>. Следует еще добавить, что закон сохранения энергии справедлив не только для полностью замкнутых систем, но и для систем, находящихся в постоянном (не зависящем от времени) внешнем поле<sup>7</sup>, например, Галилей сформулировал свой принцип относительности в условиях наличия постоянного гравитационного поля Земли.

В окружающем нас мире широко распространено вращательное движение и вообще движение с ускорением. *Ускоренное движение тел* относительно ИСО можно рассматривать в рамках механики Ньютона и специальной теории относительности (СТО)<sup>8</sup>. Ускоренное движение *систем отсчета* мы рассматривать не будем, то есть не заходим в область действия общей теории относительности.

Отметим и роль масштаба, размеров тел и связанных с ними полей по сравнению с расстоянием между телами. Электрические и магнитные поля не имеют определенных границ, стационарные связанные с телами поля выходят за границы тел и постепенно уменьшаются с увеличением расстояния от тела. Но макроскопическое электромагнитное поле за пределами тела может и отсутствовать (при равном числе беспорядочно движущихся зарядов разных знаков в нем). А при разнесенных в пространстве телах с разноименными зарядами число положительных зарядов в них должно быть равно числу зарядов отрицательных, чтобы можно было говорить о полной энергии их полей. Так как

<sup>1</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. С. 28, 47.

<sup>2</sup> Угаров В.А. Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977. С. 11.

<sup>3</sup> Стюарт И. Истина и красота: Всемирная история симметрии. М.: Астрель: CORPUS, 2012. С. 292.

<sup>4</sup> Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. С. 122.

<sup>5</sup> Гинсбург В.Л. Теория относительности. М.: Наука, 1979. С. 125.

<sup>6</sup> Мандельштам Л.И. Указ. соч. С. 132.

<sup>7</sup> Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1988. С. 25.

<sup>8</sup> Угаров В.А. Указ. соч. С. 40.

только тогда интегралы интересующих нас величин (характеризующих поля) по поверхности объема стремятся к нулю<sup>1</sup> (что соответствует определению ИСО).

Гравитационные же поля остаются всегда, но, например, силы гравитации со стороны Солнца уравновешены центробежными силами при вращении Земли вокруг Солнца. И мы имеем ИСО в виде планеты Земля (пренебрегая ее вращением вокруг своей оси). У поверхности которой в ограниченной области пространства можно выделить целый ряд подсистем, ИСО по определению Ньютона<sup>2</sup>. В общей теории относительности установлено, что евклидова геометрия хорошо работает (в механике Ньютона) только потому, что гравитационное поле на поверхности Земли довольно слабое, и пространство, в котором мы живем, не имеет заметной кривизны<sup>3</sup>. И именно в этой области пространства и обозримого отрезка времени проведены все обсуждаемые ниже опыты и работают все устройства электромеханики. Где два тела небольшой массы, движущиеся поступательно с постоянной скоростью, с точки зрения механики можно отнести к самостоятельным ИСО (пренебрегая малыми гравитационными силами их взаимодействия). А с точки зрения электродинамики это может быть не так, силы электромагнитного взаимодействия тел могут быть велики и ими пренебрегать уже нельзя.

Мало того, под действием сил гравитации тела только притягиваются друг к другу, а под действием электромагнитных сил они могут притягиваться, отталкиваться (в зависимости от знаков преобладающих в них зарядов) и поворачиваться в пространстве, что отличает механику от электродинамики движущихся тел, которую как более сложное явление нельзя свести к механике, хотя во многих частных случаях аналогии вполне возможны<sup>4</sup>.

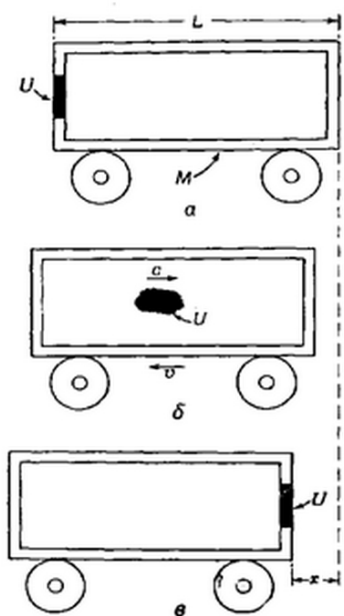


Рис. 1. Иллюстрация переноса энергии и массы, рисунок из Фейнмановских лекций по физике (Вып.6. Электродинамика. С. 302).

Обратим внимание еще и на второе обстоятельство, на то, что понятие кинетической энергии применительно к движущемуся телу имеет физический смысл (в соответствии с законом сохранения энергии) в ИСО, в замкнутой системе отсчета, в которой находится это тело. Скорость поступательного движения тела относительно любой другой ИСО не определяет кинетическую энергию тела, формально получим какое-то значение энергии, но оно не имеет физического содержания.

Действия законов сохранения энергии и импульса (в качестве иллюстрации к теории Эйнштейна) рассмотрено Фейнманом<sup>5</sup>, откуда взят рис. 1, где изображен железнодорожный вагон с большой массой  $M$ , который без трения может катиться по рельсам, и внутри которого происходит перенос некоторой массы и энергии (включая поля). Это наглядное изображение мы используем далее при рассмотрении опытов в области электромеханики, заменив чисто электромагнитный импульс, распространяющийся со скоростью  $c$ , (величиной абсолютной, а не относительной) на импульс движущегося относительно ИСО со скоростью  $v$  заряженного или намагниченного тела массой  $m$ . Дополнительно рассмотрим и вращательное движение тела  $m$  как единого целого, характеризуемое моментом импульса.

Так как при  $v \ll c$  преобразования Лоренца (характерные для СТО) переходят в преобразования Галилея, то мы будем использовать механику Ньютона, но с одной оговоркой. Будем учитывать не только импульс тела, но и дополнительные импульсы и энергию окружающего тело макроскопического электромагнитного поля, зависящие от скорости  $v$ . При преобразовании внутренней энергии вещества у левой стенки вагона (например, химической в виде взрыва) некоторое тело с массой  $m$  под действием возникшего импульса силы проходит в движение со скоростью  $v_1$  относительно центра масс (вагон массой  $M \gg m$  движется в противоположном направлении со скоростью  $v_2 \ll v_1$ ). При столкновении тела  $m$  с правой стенкой вагона наблюдателю важно для оценки последствий столкновения знать кинетическую (механическую и электромагнитную) энергию тела  $m$ , для чего необходимо знать скорость движения тела относительно вагона, которая не зависит от движения сторонних наблюдателей вне вагона, связанных с любой из множества

<sup>1</sup> Тамм И.Е. Указ. соч. С. 81.

<sup>2</sup> Борн М. Эйнштейновская теория относительности. М.: Мир, 1972. С. 73.

<sup>3</sup> Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: ЕДИТОРИАЛ УРСС, 2004. С. 126.

<sup>4</sup> Пуанкаре А. О науке. Пер. с франц. М.: Наука, 1983. С. 134.

<sup>5</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6. Электродинамика. М.: Едиториал УРСС, 2004. С. 302.

других ИСО (при малых скоростях релятивистским правилом сложения скоростей пренебрегаем). Ввиду огромной массы вагона (по сравнению с  $m$ ) согласно второму закону Ньютона ускорение его во время действия импульса силы мало, им можно пренебречь и отнести вагон к ИСО.

Вернемся теперь к электромагнитному полю, как одному из видов материи, которая не исчезает, а преобразуется в другие виды, при этом совершается работа. Борн отмечал, что движущееся заряженное тело в дополнение к электрическому полю создает *магнитное поле, служащее характеристикой работы, затраченной на перевод его из состояния покоя в движение*. Сила, необходимая для того, чтобы привести неподвижный шар в состояние движения, таким образом, оказывается в случае заряженного шара больше, чем в случае незаряженного<sup>1</sup>. Это же можно отнести и к вращению заряженного тела. Аналогично, например, химическая энергия в электрической цепи расходуется в том числе и на *увеличение энергии магнитного поля*<sup>2</sup>. А теперь рассмотрим все выше сказанное на конкретных примерах из области электродинамики движущихся тел.

### Электродинамика Максвелла и магнитное поле тока проводимости

Рассмотрим, как же у Максвелла решен вопрос с выбором системы отсчета при движении зарядов в проводнике и выполнением законов сохранения энергии и импульса. У Мандельштама<sup>3</sup> сказано, что уравнения Максвелла не содержат в себе теории явлений в движущихся телах, ибо они относятся к неподвижным телам. Максвелл, создавший свою теорию в шестидесятых годах 19 века, исходил из обобщения известных к тому времени результатов экспериментов Ампера, Фарадея и ряда других ученых, и главенствующей роли электромагнитного поля, а не зарядов. Первые же успешные опыты с изучением полей движущихся электрически заряженных тел и поляризованных диэлектриков были проведены позже (движения намагниченных тел мы коснемся в конце статьи). В теории Максвелла макроскопические тела в лабораторной системе отсчета (где находится и наблюдатель) хотя и неподвижны, но внутри этих неподвижных тел направленно движутся заряды, протекает электрический ток. А это в современном понимании направленное движение, дрейф в микромире элементарных электрических зарядов (в металлических проводниках электронов проводимости), при макроскопическом подходе их непрерывный поток с вектором плотности  $\mathbf{j}$ . Уравнения Максвелла (два из системы четырех фундаментальных уравнений электродинамики), включающие изменение полей во времени и плотность тока проводимости  $\mathbf{j}$  в гауссовой рационализированной системе единиц в дифференциальной форме выглядят в вакууме следующим образом:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \partial \mathbf{E} / c \partial t + \mathbf{j} / c \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{H} / c \partial t, \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$  – векторы напряженности магнитного и электрического полей,  $t$  – время, а  $c$  – это скорость света в вакууме. Эти же уравнения справедливы, если электрическая цепь с током плотностью  $\mathbf{j}$  выполнена из немагнитного материала, а окружающей ее средой является воздух, электромагнитные свойства которого близки к свойствам физического вакуума. Подставим в (1) выражение из курса физики<sup>4</sup> для вектора  $\mathbf{j}$

$$\mathbf{j} = ne\mathbf{u}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд отдельной частицы,  $n$  – число движущихся зарядов в единице объема проводника,  $\mathbf{u}$  – усредненная скорость зарядов, их направленного дрейфа *относительно атомной решетки проводника* (рассматриваем твердые тела).

Учитывая, что *если ток постоянный*, то  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$  не меняются во времени в системе отсчета наблюдателя, неподвижного относительно данной замкнутой электрической цепи, получим из системы двух уравнений (1) и (2) одно в виде

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = ne\mathbf{u} / c \quad (4)$$

Следовательно, *напряженность магнитного поля, созданного постоянным током, зависит от отношения  $u/c$  (зависимость первого порядка от отношения  $u/c$ )*. Это же отношение будет присутствовать и при записи уравнения (4) в интегральной форме (используя закон полного тока), то есть в решении (интегрировании) дифференциального уравнения при определении значения не только

<sup>1</sup> Борн М. Указ. соч. С. 205.

<sup>2</sup> Тамм И.Е. Указ. соч. С. 365.

<sup>3</sup> Мандельштам Л.И. Указ. соч. С. 104.

<sup>4</sup> Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С.173.

пространственной вихревой производной, но и самого вектора  $\mathbf{H}$ . Значение  $\mathbf{H}$  не зависит от скорости движения наблюдателя и системы отсчета, в которой он находится.

Мы не можем измерить значение скорости  $u$  и не знаем плотность  $n$  свободных электронов в проводнике, поэтому на практике поступают наоборот, сначала находят значение  $\mathbf{H}$  по силовому взаимодействию проводников с токами, а затем рассчитывают значение плотности тока. Чтобы создать ток в цепи и магнитное поле в пространстве вокруг нее затрачивается энергия, например химическая, часть которой идет на создание магнитного поля и увеличение потенциальной энергии цепи с током<sup>1</sup>.

Отметим, что количество близко расположенных зарядов разных знаков в проводнике с плотностью тока  $\mathbf{j}$  обычно одинаково, с учетом принципа суперпозиции результирующее электрическое поле вне проводника (на расстоянии, существенно больше межатомного) отсутствует, поля  $\mathbf{E}$  разноименных зарядов вычитаются, а магнитные поля множества движущихся в противоположные стороны друг относительно друга зарядов разных знаков суммируются, благодаря чему и было обнаружено действие магнитного поля<sup>2</sup> при очень малых значениях отношения  $u/c$ . И это магнитное поле широко используется в электромеханике при преобразовании механической энергии в энергию электрическую и обратно (в электрических машинах постоянного тока), причем без затрат энергии магнитного поля.

Теперь рассмотрим противоречие, которое в курсах общей физики обычно обходят молчанием (большинство учебников пишут преподаватели, но преподавание требует непоколебимой уверенности, а научный поиск все время требует беспокойства<sup>3</sup>). Как известно, электрическое и магнитное поля, связанные с движущимся относительно неподвижного наблюдателя электрически заряженным телом, переносятся вместе с ним в пространстве<sup>4</sup> (и должны действовать на пробный заряд). А по результатам экспериментов, начиная с опытов Фарадея, получается, что на неподвижный относительно постоянного магнита и соленоида (с движущимся в нем потоком электрических зарядов – электронов проводимости) пробный электрический заряд магнитные силы не действуют.

Однако К.С. Демирчяном<sup>5</sup> высказано сомнение в результатах этих опытов со ссылкой на малую скорость потока электронов в проводнике и недостаточную чувствительность измерительных приборов. Фейнман<sup>6</sup> тоже приводит пример с соленоидом и радиально расположенным в нем отрезком проводника. И утверждает, что проводник движется в магнитном поле и между концами линейного проводника теоретически должна появиться разность скалярных потенциалов. Вот только эффект настолько мал, что его невозможно наблюдать даже с помощью самых тонких современных приборов.

А пока нет экспериментального разрешения упомянутого противоречия, предложим возможное объяснение для усиления позиции об отсутствии увлечения магнитного поля потоком электронов проводимости. Здесь просматривается аналогия с электрическим током в полупроводниках, когда вместе с электронами носителями «тока» являются виртуальные положительно заряженные частицы – «дырки». Но это эффект квантово-механический<sup>7</sup>, то есть с позиций классической физики получаем встречное движение в проводнике отрицательных зарядов и зарядов положительных (виртуальных), которые тоже принимают участие в создании магнитного поля подобно току смещения в  $(\mathbf{I})$ . В результате мы имеем перемещение магнитного поля в пространстве вместе с контуром тока и постоянным магнитом (относительно которых мы и определяем неподвижность пробного электрического заряда), а не с потоком движущихся в проводнике электронов проводимости.

Это частично подтверждается в доступных к повторению экспериментах на базе электрических генераторов постоянного тока (при наличии тока в обмотке возбуждения и отсутствии вращения якоря). Там магнитное поле усиливается введением ферромагнетика, и чувствительности приборов (компенсаторов постоянного тока класса 0,001) достаточно для обнаружения разности потенциалов от единиц до десятков микровольт на концах проводника обмотки якоря. Измерения с учетом и устранением возможных термоэлектрических явлений в контактах дают нулевые значения, значит, на неподвижные заряды в проводниках обмотки якоря электрические силы не действуют, магнитное поле неподвижно. Правда, остаются вопросы, а все ли возможные малые эффекты учтены при замене молекулярных токов и спина электронов в объеме ферромагнетика на поверхностные токи,

<sup>1</sup> Тамм И.Е. Указ. соч. С. 239; Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 6. С. 15.

<sup>2</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 5. С. 26.

<sup>3</sup> Негушил А.В. Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники // Электричество. 1992. № 4. С. 2.

<sup>4</sup> Колесников Э.В. Релятивистские основания электромеханики // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 5. С. 74.

<sup>5</sup> Демирчян К.С. Движущееся электромагнитное поле и электротоническое состояние пустоты // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 2. С. 12.

<sup>6</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 5. С. 289.

<sup>7</sup> Сивухин Д.В. Указ. соч. С. 430.

эквивалентные токам проводимости. Вот только ответ на эти вопросы приходится искать в квантовой механике, которая не согласуется пока с классической физикой.

Если же использовать только токи проводимости (с водяным охлаждением проводников соленоида) для создания магнитного поля, то можно увеличить значения магнитной индукции примерно до 40 тесла<sup>1</sup>, но трудно при этом увеличить еще и радиус соленоида для того, чтобы получить достаточную для измерений разность потенциалов между концами помещенного в соленоид неподвижного проводника.

Желательна экспериментальная проверка возникшего противоречия потому, что как раз именно с подобных опытов начинаются развилки на путях, ведущих к построению физически понятной теории на основании обобщения результатов экспериментов. Но если в математике число различных аксиом при построении теории не ограничено, то в физике справедливость одной из двух разных аксиом выявляется при проведении экспериментов. И мы обратим на это внимание еще раз при рассмотрении магнитного поля токов переноса.

Для создания теории по результатам опытов требуется проведение измерений значений исследуемых величин (что демонстрирует приведенный выше пример). Известно, что индикатором наличия магнитного поля служит движущийся (с пересечением магнитных силовых линий<sup>2</sup>) пробный заряд. Заряд этот движется относительно системы отсчета, которой является намагниченное тело или электрическая цепь (желательно отсутствие на них избыточных зарядов одного знака). По определению, масса пробного заряда пренебрежительно мала по сравнению с массой тела, заряд мал и не должен искажать электромагнитное поле исследуемого объекта и силовым действием его на тело можно пренебречь (пренебречь сообщаемым телу ускорением), то есть считать тело по-прежнему в качестве ИСО. Свободный пробный заряд под действием силы со стороны связанного с намагниченным телом магнитного поля будет двигаться с ускорением, нужно уже *учитывать его инерцию*. Зная импульс пробного заряда и траекторию его движения, можно дать количественную оценку магнитного поля. Вот только с физическим объяснением появления сил инерции наука до сих пор испытывает затруднения, не зная, считать их фиктивными или действительными. И в физике присутствуют разные трактовки связи массы и энергии (знаменитой формулы Эйнштейна  $E_0 = mc^2$ ), инерции и гравитации<sup>3</sup>.

Магнитное поле можно проще измерить другим способом, с помощью магнитометра, неподвижного относительно намагниченного тела или цепи с током. Значение напряженности магнитного поля оценивается в магнитомеханическом преобразователе по углу поворота малой токовой петли в магнитном поле (практически это может быть намагниченная стрелка, выполненная из ферромагнетика и подвешенная на тонкой упругой нити<sup>4</sup>). Пара сил (момент), действующих на токовую петлю, уравновешивается силами упругости нити, а упругость (жесткость) ее вещества определяется сочетанием электрических сил в микрополях и квантово-механическими эффектами<sup>5</sup>. Но и здесь используется феноменологический подход, так как механические свойства вещества нити оцениваются введением экспериментально полученных коэффициентов, изучение появления которых уводит нас из классической физики *в область квантовой механики*.

Поэтому вернемся к электродинамике движущихся тел в рамках практического применения ее условиях Земли, принятой за ИСО, и при  $v \ll c$ . Рассматривая при этом инерцию и механические свойства вещества с феноменологических (по внешним признакам) позиций, как это принято в классической физике.

### Электродинамика движущихся тел Герца и Лоренца

Подробный анализ работ Герца и Лоренца сделан в упомянутых лекциях Мандельштама, где математическая сторона вопроса представлена на достаточно серьезном уровне, не оттесняя при этом на второй план объяснение явлений с физических позиций. Но там основной упор сделан на критику понятия светоносного эфира, присутствующего у Герца и Лоренца. А так как после экспериментов Майкельсона и работ Эйнштейна понятие светоносного эфира было удалено из электродинамики, то мы не будем к нему возвращаться и рассмотрим работы Герца и Лоренца с точки зрения выполнения упомянутых общих законов сохранения и систем отсчета, которые они подразумевали (судя по трактовке ими результатов экспериментов).

<sup>1</sup> Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1987. С. 80.

<sup>2</sup> Сивухин Д.В. Указ. соч. С. 210.

<sup>3</sup> Окунь Л.Б. Понятие массы. (Масса, энергия, относительность) // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 3. С. 511. Горбачевич Ф.Ф. Инерция и гравитация [Электронный ресурс] // Библиотека антирелятивистской литературы. Режим доступа: <http://www.elibrari-antidogma.narod.ru>Gorbatsevitch4/pdf>.

<sup>4</sup> Эйхенвальд А.А. Электричество. М. – Л.: Гос. тех.-теор. издат. 1933. С. 329.

<sup>5</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 5. С. 11.

Первым распространил теорию Максвелла на движущиеся тела Герц, не выходя за пределы представлений Фарадея и Максвелла о поле. Герц сознательно ограничил область применения своей теории электромеханикой, когда скорость движения тел  $v \ll c$  и электромагнитное излучение при движении тел отсутствует, хотя сам же экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

В противном случае задача выглядела явно неразрешимой, даже в наше время релятивистская электромеханика<sup>1</sup> слишком сложна, а из математического решения подобных задач трудно выйти без потерь<sup>2</sup>, да еще и учесть при решении и в экспериментах все влияющие факторы второго порядка малости. Упрощения же на конечном этапе трудоемкого релятивистского решения с использованием СТО при  $v \ll c$  возвращают нас снова к решениям Герца и Лоренца.

Уравнения Максвелла-Герца, дополняющие (1) и (2), выглядят следующим образом:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = (1/c)(\partial \mathbf{D}/\partial t + \operatorname{rot}(\mathbf{D} \times \mathbf{v}) + \mathbf{v} \operatorname{div} \mathbf{D} + \mathbf{j}) \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -(1/c)(\partial \mathbf{B}/\partial t + \operatorname{rot}(\mathbf{B} \times \mathbf{v})), \quad (6)$$

где  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  – вектор электрического смещения,  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  – вектор магнитной индукции, а  $\epsilon$  и  $\mu$  – относительные электрическая и магнитная проницаемости вещества.

У Герца Земля принята за ИСО, несмотря на ее вращение вокруг своей оси. Что и с современной точки зрения, исходя из теории относительности, вполне допустимо и соответствует практическому принципу относительности<sup>3</sup>. Известны два возражения против теории Герца. Первое состоит в том, что в ней есть скорость эфира, полностью увлекаемого движущимся телом. Однако если заменить эфир электрическим кулоновским полем  $\mathbf{E}$  и магнитным полем  $\mathbf{B}$ , перемещающимися в пространстве вместе с телами, своими источниками (при  $v \ll c$ ), то это возражение снимается. Тогда теория Герца позволяет правильно рассчитать электрическое поле в опытах Фарадея с униполярным генератором и магнитное поле при относительном движении пластин заряженного конденсатора, это опыт Роуленда<sup>4</sup>, не прибегая к понятию эфира.

Второе возражение состоит в том, что теория Герца с вектором  $\mathbf{D}$  не объясняет результаты опытов Рентгена, Эйхенвальда и Вильсона<sup>5</sup>. Хотя можно сохранить уравнения Герца и для этих случаев, введя дополнительный коэффициент увлечения поля в диэлектрике по результатам экспериментов, но он выйдет искусственно и не находит физического объяснения у Герца.

И такие объяснения нашел Лоренц. На первом этапе своих исследований, до обращения к оптике (где электромагнитные волны распространяются в пространстве уже независимо от зарядов и тел, их источников) и объяснению результатов измерений Майкельсона (что привело в итоге к созданию СТО с ее преобразованиями Лоренца, физическое объяснение которым предложил Эйнштейн), Лоренц по существу завершил работу Герца. Чья теория не могла объяснить явления, связанные с движением диэлектриков в электрических или магнитных полях, так как во времена Герца не было четких представлений о строении диэлектриков.

Лоренц предложил качественно новый, более глубокий подход к электродинамике движущихся тел, свою электронную теорию, учитывающую внутренние электродинамические процессы в телах, в веществе. Он предположил, что положительно заряженные частицы (ионы) и отрицательно заряженные электроны, из которых состоит вещество, взаимодействуют между собой посредством электромагнитных полей, где в вакууме действует электродинамика Максвелла. Появилась возможность изучать механику с позиций электродинамики, и даже были предложения именно так начинать изучение физики. Теория Лоренца используется и сейчас<sup>6</sup>, если не углубляться в область действия квантовой механики, так как в микромире на малых расстояниях от заряда (примерно в сто раз меньше расчетного радиуса электрона) уже нельзя пользоваться уравнениями Максвелла<sup>7</sup>.

После усреднения (перехода к макроскопическим полям) Лоренц получил для движущихся тел аналог дифференциальных уравнений (5) и (6) в виде:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = (1/c)(\partial \mathbf{E}/\partial t + \partial \mathbf{P}/\partial t + \operatorname{rot}(\mathbf{P} \times \mathbf{v}) + \rho \mathbf{v} + \mathbf{j}) \quad (7)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -(1/c)(\partial \mathbf{B}/\partial t). \quad (8)$$

<sup>1</sup> Колесников Э.В. Релятивистские основания электромеханики. // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 1. С. 50.

<sup>2</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 6. С. 146.

<sup>3</sup> Мандельштам Л.И. Указ соч. С. 135.

<sup>4</sup> Борн М. Указ. соч. С. 188.

<sup>5</sup> Мандельштам Л.И. Указ. соч. С. 129.

<sup>6</sup> Там же. С. 136.

<sup>7</sup> Сивухин Д.В. Указ. соч. С. 389.



И еще он добавил к уравнению (8) выражение для силы, действующей на электрический заряд  $\rho$  со стороны электромагнитного поля в следующем виде<sup>1</sup>

$$\mathbf{F} = \rho\mathbf{E} + (1/c)\rho(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (9)$$

С точки зрения математики, это уже интегральное уравнение, являющееся решением уравнения дифференциального.

Предполагается, что, в соответствие с опытами, электрическое и магнитное поля действуют на заряд  $\rho$  независимо. Поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  могут входить в (9) как постоянные величины, появляющаяся при интегрировании, начальные условия. Поля  $\mathbf{E}$  может и не быть (при движении заряда относительно замкнутого контура постоянного тока, рассмотренного выше), что определяется не математикой, а конкретными физическими условиями. Что касается системы отсчета, в которой следует определять значение  $\mathbf{B}$  по значениям  $\mathbf{v}$  пробного заряда и магнитной составляющей силы Лоренца  $\mathbf{F}$  в (9), чтобы оно имела физический смысл, то это мы рассмотрим ниже на примере движения заряда в ИСО.

Введение вектора поляризации  $\mathbf{P}$  в (7) позволило Лоренцу отказаться от вспомогательного вектора  $\mathbf{D}$  в уравнениях Герца и дать физическое объяснение введению в них коэффициента увлечения, но не эфира, а электрических полей, – связанного со свободными зарядами в проводниках (первичного поля  $\mathbf{E}$ ), и определяемого связанными зарядами в поляризованных диэлектриках (вторичного поля  $\mathbf{P}$ ). При этом связь упомянутых векторов определяется выражением<sup>2</sup>

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}.$$

Здесь нужно учитывать еще и форму тела, состоящего из диэлектрика. Форма тела это по существу граничные условия при решении дифференциальных уравнений, и определяются они конкретными физическими условиями, могущими быть весьма разнообразными. Но мы рассмотрим далее опыты, где ситуация проще, однородный диэлектрик заполняет все пространство, занимаемое полем  $\mathbf{E}$ .

Экспериментальную проверку справедливости уравнения (7) Лоренца в электромеханике (выяснение причины появления магнитного поля) провел Эйхенвальд<sup>3</sup>, измеривший интенсивность магнитного поля при повторении опытов Роуланда и Рентгена, и добавивший свои варианты движения заряженных тел. Предложил же провести такой эксперимент (и конструкцию опытной установки) Максвелл<sup>4</sup>, что потом и было реализовано. Эйхенвальд измерял магнитное поле, вызванное током переноса (конвекции), которое было в 100 000 раз и даже в миллион раз слабее, чем магнитное поле Земли. Что достойно уважения, так как и сейчас, спустя век, это находится на границе чувствительности современных измерительных приборов, использующих явление ядерного магнитного резонанса.

И все же опыты Эйхенвальда не только подтвердили теорию Максвелла-Лоренца, но и оставили некоторые вопросы. По поводу подобных опытов Капица говорил, что один опыт, сделанный с предельной точностью, всегда неубедителен. И чтобы его проверить, надо, чтобы нашелся еще один экспериментатор, готовый на него затратить тоже лет десять усиленной работы<sup>5</sup>. А ведь количественные результаты, полученные Эйхенвальдом, по мнению Мандельштама, много дали для теории относительности<sup>6</sup>, с чем, однако, трудно согласиться. Сам Эйхенвальд не утверждал подобного, его опыты подтвердили точку зрения Лоренца, что эфир неподвижен и не увлекается телами. Но не ответили на вопрос о необходимости наличия в электродинамике понятия светоносного эфира<sup>7</sup>. Так как его отсутствие в СТО подтверждается совсем другими экспериментами<sup>8</sup>. В том числе связанными с электромагнитным излучением, возможность возникновения которого мы здесь принимаем во внимание, но не рассматриваем из-за малости скорости движения тел  $v \ll c$ .

Наибольшие сомнения до сих пор оставляет эксперимент Эйхенвальда с вращением заряженного электрического конденсатора как единого целого (включая диэлектрик с отличным от единицы значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ ), когда было обнаружено магнитное поле. Что и сейчас служит причиной призывов вернуться к понятию эфира, присутствовавшего в физике XIX века<sup>9</sup>. Это вторая развилка на пути построения электродинамики движущихся тел на основе ограниченного числа

<sup>1</sup> Там же. С. 211.

<sup>2</sup> Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. С. 78.

<sup>3</sup> Эйхенвальд А.А. Электричество. М.-Л.: Гостехтеориздат, 1933. С. 327.

<sup>4</sup> Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952. С. 529.

<sup>5</sup> Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1987. С. 403.

<sup>6</sup> Мандельштам Л.И. Указ соч. С. 103.

<sup>7</sup> Эйхенвальд А.А. Указ. соч. С. 331.

<sup>8</sup> Борн М. Указ. соч. С. 341.

<sup>9</sup> Петров В.В. Увлечение эфира твердыми телами. Опыты Эйхенвальда и Вильсона [Электронный ресурс] // Bourabai Research. Официальный сайт частного Боровского исследовательского учреждения по внедрению новых технологий. Режим доступа: <http://www.bourabai.kz/petrov/eihenwald.htm>.

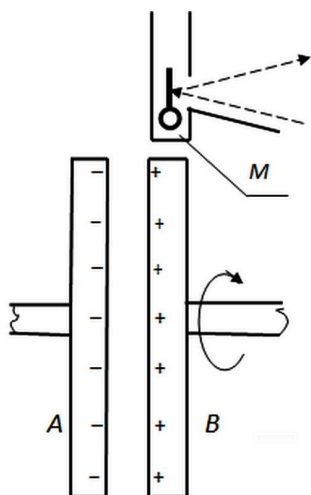


Рис. 2. Схема экспериментов Эйхенвальда с вращающимися пластинами А и В электрического конденсатора, где М это магнитометр.

экспериментальных данных в области электромеханики, поэтому внимательнее рассмотрим данный эксперимент.

Схема эксперимента представлена на рис. 2, в простейшем варианте это два разноименно заряженных диска А и В (конденсатор), могущих вращаться совместно (как единое целое) или раздельно в произвольных направлениях. Вращение тел рассматриваем в лабораторной ИСО, где ось их вращения неподвижна. Появление магнитного поля при совместном вращении дисков Эйхенвальд объяснял или движением зарядов относительно эфира, или движением относительно магнитной стрелки М магнитометра. Но стрелка магнитометра подобна пробному заряду, пробный заряд по определению мал и (движущийся или неподвижный) не должен заметно влиять на исследуемое поле, а тем более вызывать его появление. При удалении еще и понятия эфира из электродинамики получается, что объяснения появления магнитного поля в данном случае нет?

Покажем, однако, что возникший гордиев узел можно развязать, предложив еще одно объяснение. Магнитная стрелка М защищена от действия электрического поля рассеяния конденсатора и других сторонних электрических полей электростатическим экраном. Внутри него поля Е нет, но на наружной поверхности экрана, расположенного в поле Е рассеяния конденсатора, появятся электрические заряды разных знаков, расположение их зависит от геометрической формы и расположения экрана относи-

тельно дисков. При вращении дисков надо учитывать движение зарядов на их поверхностях (небольшой скоростью сдвига свободных зарядов в самих дисках пренебрегаем) относительно неподвижных зарядов на внешней поверхности электростатического экрана. Что и приводит к появлению магнитного поля, действующего на магнитную стрелку М (первичный измерительный магнитомеханический преобразователь) прибора, как и при вращении одного диска.

Можно утверждать, что *скорость  $v$  в приведенных выше уравнениях это скорость движения тел с зарядами разных знаков* (здесь уже зарядов не виртуальных, а в виде электронов и ионов) *друг относительно друга*. При движении свободных зарядов друг относительно друга или (при поляризации диэлектрика) относительно зарядов связанных появление вихревого магнитного поля объясняется феноменологически с помощью аналогии с поведением несжимаемой жидкости между движущимися в противоположных направлениях поверхностями, где расположены заряды. Такой аналогией пользовался Максвелл<sup>1</sup>, который считал, что магнитное поле имеет вихревую природу<sup>2</sup>, ее используют и сейчас для пояснения характеристик векторных полей, к которым можно отнести электромагнитное поле, хотя поле нельзя считать скоростью чего-то<sup>3</sup>. Эфир для этого объяснения не нужен, достаточно полей.

Однако у Лоренца эфир несет еще дополнительную функцию *выделенной*, предпочтительной ИСО. И здесь возникает опасность «с водой выплеснуть и ребенка». С энергетических позиций, физический смысл имеет значение полной (потенциальной и кинетической) энергии связанных с зарядами полей только в той замкнутой системе отсчета, где происходят события. Вот ее мы и *можем, как Лоренци, считать выделенной*. Однако таких ИСО много, теоретически наблюдатель может быть расположен в другой ИСО, движущейся относительно первой, выделенной, где происходит наблюдаемое физическое событие. Конечно, всегда было предпочтительно производить эксперименты для выяснения физических зависимостей в лабораторной, *выделенной* системе отсчета, где находился и наблюдатель. А не наблюдать за событиями в движущейся лаборатории, вагоне рис. 1, находясь на перроне (хотя подобные ситуации встречаются из-за недоступности объекта наблюдения). Находясь в лабораторной выделенной ИСО, наблюдатель может сразу определить скорость  $v$ , присутствующую в приведенных выше формулах. Например, в (9), где пробный заряд движется относительно ИСО, источника магнитного поля в виде электрической цепи или постоянного магнита, не требуется пересчет с использованием преобразований Галилея (к которым сводятся и преобразования Лоренца при  $v \ll c$ ).

Остается еще вопрос, если движется заряженное тело с постоянной скоростью  $v$  и переносит собой электрическое и магнитное поле, то относительно чего рассматривать скорость  $v$ , ведь множество ИСО движутся с произвольными скоростями. Снова призовем на помощь энергетический подход. На создание магнитного поля в прошлом при удалении зарядов друг от друга была затрачена

<sup>1</sup> Максвелл Дж.К. Указ. соч. С. 17.

<sup>2</sup> Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. С. 295.

<sup>3</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 5. С. 15.

энергия. При приложении импульса силы к движущемуся телу происходило преобразование энергии (химической, механической и т.п.) в энергию движущегося тела, частью которой является энергия магнитного поля (еще увеличился и механический импульс тела, но это мы оставляем за скобками). Далее при движении тела в вакууме с постоянной скоростью эта энергия в магнитном поле (и само поле) сохраняется как следствие, как память о преобразовании энергии в прошедшем времени и, возможно, в отдаленной области пространства.

Здесь можно увидеть аналог в механике, на приведение в движение диска  $B$  рис. 1 до заданной угловой скорости была затрачена энергия, далее при отсутствии потерь на трение в опорах скорость и момент импульса остаются постоянными. Получили накопитель энергии, если диски это и пластины заряженного конденсатора, то еще дополнительно получим накопление и сохранение энергии в магнитном поле. При торможении вращающегося диска уменьшается ток переноса и магнитное поле, изменение  $\mathbf{H}$  во времени в соответствии с (2) вызывает появление электрического вихревого поля (ротора  $\mathbf{E}$ ) и соленоидального поля  $\mathbf{E}$ , уже не связанного с зарядами как с источниками, стоком и истоком поля (отличного от кулоновского потенциального поля). И оно препятствует уменьшению скорости движения переносимых диском зарядов, на что затрачивается запасенная в поле  $\mathbf{H}$  энергия (преобразуется в энергию другого вида). И это сохраненное поле  $\mathbf{H}$  с его энергией с точки зрения математики представляет начальное условие для решения дифференциального уравнения (2).

Вернемся теперь к силе Лоренца (9) и отметим, что сила  $\mathbf{F}$  может зависеть от одной причины, от действия электрической и магнитной составляющей поля одной и той же одноименно заряженной частицы вещества (движущейся относительно зарядов другого знака в лабораторной выделенной ИСО). И при  $v \ll c$  магнитной составляющей силы  $\mathbf{F}$  можно пренебречь в сравнении с электрической составляющей. Другая ситуация это если имеем движущееся намагниченное тело или соленоид с равной плотностью положительных и отрицательных зарядов в нем, и тогда уже электрической составляющей силы  $\mathbf{F}$  можно пренебречь. Может иметь место и сочетание этих двух факторов, когда в формуле (9) нужно учитывать оба слагаемых, но тогда электрическое и магнитное поля в (9) связаны с разными зарядами, они независимы. В отличие от *единой системы движущийся заряд – электрическое поле – магнитное поле*. И все это нужно учитывать в виде начальных условий при решении уравнений электродинамики.

Также требует осторожности переход наблюдателя в систему отсчета движущегося макроскопического заряда, когда утверждается, что в ней заряд покоится, и мы будем наблюдать только электрическое поле<sup>1</sup>. Что часто понимают как относительность (связанную с наблюдателем) магнитного поля. И что противоречит ранее упомянутому утверждению о переносе электрического и магнитного поля вместе с зарядом.

Но, как мы уже подчеркивали, переход наблюдателя в другую систему отсчета не влияет на физические процессы. Переход его в систему отсчета движущегося заряда  $q_1$  не должен привести к исчезновению (преобразованию) связанного с  $q_1$  магнитного поля и запасенной в ней энергии (при неизменных значениях скорости  $v_1$ ). Используя магнитометр, наблюдатель в данном примере при переходе в систему отсчета движущегося в выделенной ИСО заряда  $q_1$  в принципе может обнаружить наличие связанного с ним магнитного поля. Хотя оно и существенно меньше поля электрического (по вкладу в силу в (9)). В рассматриваемых условиях ( $v \ll c$  и нет ускорений) согласно Фейнману поля движущегося заряда в точках пространства выделенной ИСО меняются медленно, эффект запаздывания компенсируется поправочным слагаемым в уравнении для электрической составляющей  $\mathbf{E}$  электромагнитного поля движущегося заряда. И переносимое зарядом поле  $\mathbf{E}$  можно рассматривать как кулоновское, а поле  $\mathbf{H}$  (и поле  $\mathbf{B}$ ) можно определять по закону Био и Савара (в ближней от заряда зоне<sup>2</sup>). Но в него (где ток это движение зарядов) входит ранее приобретенная скорость  $v_1$  (аналог скорости  $\mathbf{u}$  в (3) и (4)), не имеющая отношения к движению наблюдателя. Причем запаздыванием сигнала можно пренебречь даже в полях, связанных с переменными токами промышленной частоты (когда  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в (1) и (2) являются функциями времени и заряды движутся с небольшими ускорениями), например, в электромеханике, где расстояние между телами существенно меньше длины электромагнитной волны<sup>3</sup>.

Однако возможна и другая ситуация, когда заряд  $q_1$  неподвижен (статика) в своей выделенной (напомним, замкнутой) ИСО, которая движется как единое целое относительно наблюдателя в другой ИСО со скоростью  $v'$ . Тогда магнитометр в ИСО заряда  $q_1$  не обнаружит магнитного поля, а за

<sup>1</sup> Иродов И.Е. Указ. соч. С. 204.

<sup>2</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 6. С.146. С. 156.

<sup>3</sup> Матвеев А.Н. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980. С. 201.

пределами этой выделенной ИСО на ее границе по определению ИСО нет и поля **Е**. Опять нужно учитывать конкретные начальные условия.

И, наконец, еще одна из вех на пути развития физического понимания электродинамики движущихся тел рассмотрена нами ранее<sup>1</sup>. Она связана уже с объяснением явления униполярной индукции, где два противоречивых объяснения не поддаются непосредственной проверке в ходе экспериментов. Что допускает возможность парадокса, разного физического понимания и объяснения вторых слагаемых в правых частях уравнений (6) и (9).

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что при переходе наблюдателя из одной ИСО в другую ИСО нужно соблюдать осторожность, необходимо *считаться с конкретными физическими условиями, а не полагаться полностью на математический формализм*.

Кроме того, в физике до сих пор наблюдаются трудности в понимании, что представляет собой *само электромагнитное поле*. На то, что принципа относительности и закона Кулона здесь недостаточно, указывал Фейнман<sup>2</sup>. Кроме того, существует *единое электромагнитное поле при электромагнитном излучении* (уже не связанное с зарядами), с которым вообще нельзя связать систему отсчета и говорить об относительности полей, а использование принципа наименьшего действия в теории поля<sup>3</sup> подразумевает наличие и учет инерции, с объяснением которой (как и с массой) в физике есть сложность, что затрудняет и понимание магнитной составляющей электромагнитного поля.

И когда ставится вопрос о существовании магнитного поля<sup>4</sup>, то это подобно вопросу о существовании инерции или массы полей<sup>5</sup>. Утверждение, что если в статике магнитного поля нет, то главенствующая роль в электромагнитных процессах принадлежит электрическому полю, мало продвигает нас в физическом понимании электромагнитного поля, ведь статика это крайний случай электродинамики. И даже в этом случае это лишь суперпозиция, усреднение движения в микромире, где статика вообще нет, а есть финитное (в ограниченной области пространства) движение элементарных частиц и связанных с ними полей (и не только электромагнитных).

Возможно, что дальнейшее продвижение на пути физического понимания электромагнитного поля будет достигнуто на пути сближения разных дисциплин, теории относительности, где в 2015 г. появились сообщения об обнаружении на установке LIGO гравитационных волн – и квантовой (волновой) механики, где при экспериментах в CERN на международной сложной и дорогой установке LHC (БАК) при участии российских ученых в 2012 г. были зафиксированы следы бозона Хиггса, с полем которого связывают объяснение наличия массы у элементарных частиц. Хотя теоретические построения здесь пока абстрактны и далеки от первоначальных представлений Эйнштейна о физической теории, приведенных в начале статьи.

### Выводы

Справедливость системы дифференциальных уравнений Максвелла-Лоренца для электромагнитного поля, описывающих события в определенной макроскопической точке пространства выделенной инерциальной системы отсчета в определенный момент времени, подтверждается практикой и не вызывает сомнений. При этом магнитное поле, связанное с движущимися в своей инерциальной системе отсчета зарядами, с электрическим током проводимости или током переноса, является зависимостью первого порядка от отношения скорости движения зарядов к скорости света.

При решении этих уравнений следует большее внимание уделять граничным и начальным условиям, которые определяются не математикой, а многообразием условий развивающегося в пространстве и времени окружающего нас физического мира, и где ряд явлений, например, наличие магнитного поля, связанного с зарядами, движущимися относительно зарядов противоположного знака, может зависеть от событий, произошедших в прошлом, что должно учитываться в виде заданных начальных условий при решении дифференциальных уравнений.

Что касается электродинамики движущихся тел, то не все опыты в области электромеханики находят в ней однозначное объяснение, что связано как с недостаточной чувствительностью измерительной аппаратуры, так и с тем, что не все возможные эксперименты были реализованы – или же с тем, что при построении теории было выбрано одно из двух возможных объяснений, которое было принято в качестве аксиомы. А доказательство аксиом требует выхода за рамки существующих теорий.

<sup>1</sup> Малыгин В.М. Физические основы электромеханики: специальная теория относительности и особенности симметрии системы уравнений Максвелла // *Пространство и Время*. 2016. № 1–2. С. 89–100.

<sup>2</sup> Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 6. С. 264.

<sup>3</sup> Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Наука, 1988. С. 43; Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Указ. соч. Вып. 6. С.108.

<sup>4</sup> Петров В.М. А существует ли магнитное поле? // *Электро*. 2004. № 1. С. 49–52.

<sup>5</sup> Борн М. Указ. соч. С. 278.

Использование принципа относительности в электродинамике движущихся тел требует осмотрительности. Если исходить из закона сохранения энергии, то необходимо считаться с наличием выделенных инерциальных систем отсчета, где происходят изучаемые физические явления и учитывать особенности, следующие из самого определения инерциальных систем отсчета как систем замкнутых. Преувеличение же роли преобразований Галилея в электродинамике движущихся тел (применительно к связанным с ними полям) негативно отражается и на физическом понимании роли преобразований Лоренца в специальной теории относительности в части кинематики, в пересчете показаний приборов из одной инерциальной системы отсчета в другую.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ампер А.-М. Электродинамика. М.: Наука, Изд-во АН СССР, 1954. 492 с.
2. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. М.: Мир, 1972. 368 с.
3. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: Едиториал УРСС, 2004. 256 с.
4. Гинсбург В.Л. О теории относительности. М.: Наука, 1979. 240 с.
5. Горбачевич Ф.Ф. Инерция и гравитация [Электронный ресурс] // Библиотека антирелятивистской литературы. Режим доступа: <http://www.elibrari-antidogma.narod.ru>Gorbatsevitch4/pdf>.
6. Грин Б. Элегантная вселенная: Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 288 с.
7. Демирчян К.С. Движущееся электромагнитное поле и электротоническое состояние пустоты // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 2. С. 3–20.
8. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 319 с.
9. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1987. 496 с.
10. Клайн М. Математика. Поиск истины. М.: Мир, 1988. 295 с.
11. Колесников Э.В. Релятивистские основания электромеханики // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 1. С. 50–63.
12. Колесников Э.В. Релятивистские основания электромеханики // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 5. С. 69–94.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1988. 216 с.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 3: Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с.
15. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952. 688 с.
16. Малыгин В.М. Силы магнитного взаимодействия проводников с токами: особенности формулы Ампера и третий закон Ньютона. // Пространство и Время. 2016. № 3–4. С. 86–92.
17. Малыгин В.М. Физические основы электромеханики: специальная теория относительности и особенности симметрии системы уравнений Максвелла. // Пространство и Время. 2016. № 1–2. С. 89–100.
18. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
19. Матвеев А.Н. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980. 383 с.
20. Нетушил А.В. Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники // Электричество. 1992. № 4. С. 1–4.
21. Окунь Л.Б. Понятие массы. (Масса, энергия, относительность) // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 3. С. 511–530.
22. Петров В.В. Увлечение эфира твердыми телами. Опыт Эйхенвальда и Вильсона [Электронный ресурс] // Bourabai Research. Официальный сайт частного Боровского исследовательского учреждения по внедрению новых технологий. Режим доступа: <http://www.bourabai.kz/petrov/eihsenwald.htm>.
23. Петров В.М. А существует ли магнитное поле? // Электро. 2004. № 1. С. 49–52.
24. Пуанкаре А. О науке. М.: Наука, 1983. 560 с.
25. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 656 с.
26. Стюарт И. Истина и красота: Всемирная история симметрии. М.: Астрель, CORPUS, 2012. 451 с.
27. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
28. Угаров В.А. Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977. 384 с.
29. Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 512 с.
30. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. Электричество и магнетизм. М.: Едиториал УРСС, 2004. 304 с.
31. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6. Электродинамика. М.: Едиториал УРСС, 2004. 352 с.
32. Эйнштейн А. Сущность теории относительности. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 160 с.
33. Эйхенвальд А.А. Электричество. М. – Л.: Гостехтеориздат, 1933. 782 с.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Малыгин, В. М. Развитие физических представлений об электродинамике движущихся тел: эксперименты и трудности на пути создания теории / В.М. Малыгин // Пространство и Время. — 2017. — № 1(27). — С. 83—95. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271prov\_r\_st1-27.2017.25.