

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР

Московский областной педагогический институт им. Н.К.Крупской

Фр 208  
1981 В.И. ДОКУЧАЕВ

Теоретическое исследование и интерпретация некоторых  
вопросов, связанных с движением электромагнитной энергии,  
на основе теории относительности

Специальность 052 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени канди-  
дата физико-математических наук.

г. Москва  
1970 г.

Работа выполнена на кафедре теоретической физики  
Московского областного педагогического института им. Н.К.Крупской

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент А.А. Сенкевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.И. Мороз,

кандидат технических наук В.А. Бунин.

Ведущее предприятие:

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, лаборатория высоких энергий.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 19\_\_ г.

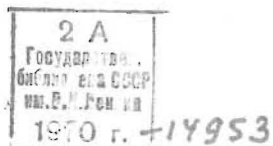
Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 19\_\_ г.

на заседании Ученого Совета МОПИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МОПИ.

Секретарь Ученого Совета

/И.Л. Холодова/



Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию и интерпретации некоторых вопросов теории электромагнитного поля, связанных с движением электромагнитной энергии в пространстве. В I главе диссертации дается критический обзор, физические предпосылки и постановка этих вопросов, обстоятельное решение которых на базе применения трансформационных соотношений теории относительности для электрических и магнитных полей, плотностей зарядов и токов, излагается в двух последующих главах. Полученные в работе выводы могут рассматриваться как непосредственные следствия, вытекающие из релятивистской теории поля. Показано, что имеющееся в настоящее время большое количество экспериментальных подтверждений теории относительности в части преобразований Лоренца для пространственных координат и времени касается в основном проверки одного из основных выводов теории о релятивистском замедлении времени. Вместе с тем не делалось ни одной попытки экспериментального обнаружения другого не менее важного вывода теории относительности о сокращении длины движущихся объектов (см. например, У.И. Франкфурт. Специальная и общая теория относительности, Изд. "Наука", М., 1966 г.). Известно, что в результате указанного релятивистского сокращения расстояний между движущимися с различными скоростями разноименными электрическими зарядами в проводниках с током, при наблюдении одного и того же замкнутого контура из различных инерциальных систем координат противоположные стороны этого контура будут казаться заряженными разноименными электрическими зарядами. Причем в различных системах координат какой-то заданный элемент контура будет заряжен

не одинаково как по величине, так и по знаку (см., например, Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, т. 5, Изд. "Мир", М., 1966 г.). Это кажущееся возникновение зарядов на различных участках контура с током не соответствует какому-либо перетеканию зарядов из одного места контура в другое, а является лишь следствием метода одновременного измерения данным наблюдателем видимой для него плотности зарядов, т.е. расстояний между зарядами, которые различны для разных наблюдателей, движущихся с произвольными скоростями мимо рассматриваемого контура. Особый интерес в связи с обсуждаемой проблемой приобретает вопрос, решение которого дается в одной из последующих глав, о том, что должен увидеть неподвижный наблюдатель, если в его системе координат в какой-то момент времени некая произвольная нейтральная электрическая цепь с током будет приведена во вращение. Такой замкнутой цепью может служить прямой соленоид с током или прямой магнит, вращательное движение которых практически используется в особом классе электрических машин-униполярных генераторов постоянного тока. Поставленный вопрос связан с релятивистским сокращением вращающейся окружности или, что то же самое, с сокращением расстояний между любыми двумя метками на этой окружности, т.е. с так называемым парадоксом Эренфеста (см., например, Arzelies H. *Relativistic Kinematics*, Oxford, Pergamon Press, 66г., XI). Дается интерпретация указанного вопроса с позиции метода одновременного измерения расстояний между любыми двумя пространственными метками на вращающейся окружности и предлагается способ экспериментальной проверки парадокса Эренфеста.

Второй вопрос, исследуемый в диссертации и формулируемый в ее первой главе, связан с одной из основных теорем теории электромагнитного поля-теоремой Пойнтинга, показывающей, что энергия и соответственно масса поля могут втекать и вытекать из заданного объема через его поверхность в виде потока с плотностью, описываемой вектором Пойнтинга

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$

где  $c$  - скорость света,  $\vec{E}$  - электрическое поле,  $\vec{H}$  - магнитное поле в вакууме в Гауссовой системе единиц.

Известно, что поток энергии обладает плотностью механического импульса  $\vec{p} = \frac{\vec{S}}{c^2}$  и плотностью момента импульса  $\vec{M} = [\vec{p} \cdot \vec{r}]$ , т.е. основными кинематическими характеристиками движущейся сплошной среды. Однако, нахождение скорости движения потока электромагнитной энергии, чему было посвящено большое количество работ, не увенчалось успехом до настоящего времени (см., например, О.Б. Брон. Поток электромагнитного поля, ЦЕТИ, 1958г. и Emerson M. Pugh, *Physical Significance of the Poynting Vector in Static Fields*, "Amer. J. Phys.", v. 35, p. 153-156, № 2, 1967г.).

Обычно делаемое априорное предположение, что поток электромагнитной энергии всегда должен двигаться со скоростью света  $c$  (см., например, Л.Б. Слепьян. Электромагнитный вектор Умова и поле линии передачи, Электричество, № 8, 1958г.) наталкивается на серьезные затруднения, в частности, как это показано в первой главе диссертации, оно находится в прямом проти-

воречии с преобразованиями Лоренца для электромагнитных полей. В одной из работ по указанному вопросу (см. М. А. Леонтович. Эволюция представлений о магнитных и электрических силовых линиях, УФН, т. XXXIV вып. 4, декабрь 1964 г.) делается предположение, что для случая взаимоперпендикулярных полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в рассматриваемой точке за скорость потока энергии можно принять одно из двух значений:

$$v_1 = c \frac{E}{H} \quad \text{при } H \geq E \quad \text{и} \quad v_2 = c \frac{H}{E} \quad \text{при } E \geq H$$

Однако, для общего случая произвольных по величине и направлению полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  решение поставленной задачи в указанной статье не дается. Вплотную к вопросу о нахождении скорости потока электромагнитной энергии примыкает и вопрос о полной кинематической массе-энергии электромагнитного поля, т.е. о полной плотности массы-энергии в потоке электромагнитной энергии. Решение указанных двух вопросов теории движения электромагнитной энергии для общего случая произвольных по величине и направлению электрических и магнитных полей приведено в следующей главе.

Глава 2 диссертации посвящена подробному рассмотрению вопроса о кинематическом описании движения потока электромагнитной энергии  $\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \cdot \vec{H}]$  для случая произвольно направленных электрических и магнитных полей и его взаимодействию с внесенными в него зарядами. Показано, что, исходя из преобразований Лоренца, в общем случае скорость потока энергии лежит в диапазоне от 0 до скорости света  $c$  и выражается формулой:

$$v = c (\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1})$$

где

$$\gamma = \frac{E^2 + H^2}{2|[\vec{E} \cdot \vec{H}]|}$$

Отсюда, в частности, следует, что  $v$  достигает скорости света только при соблюдении одновременно двух условий

$$(\vec{E} \cdot \vec{H}) = 0 \quad \text{и} \quad |\vec{E}| = |\vec{H}|$$

При полях не взаимоперпендикулярных, т.е. при  $(\vec{E} \cdot \vec{H}) \neq 0$  в лабораторной системе присутствует два не взаимодействующих и движущихся с одинаковой скоростью потока энергии, образованных электрическим  $\vec{E}$  и магнитным  $\vec{H}$  полями, коллинеарными в системе координат, перемещающейся относительно лабораторной системы со скоростью, равной скорости движения потока энергии. Электрическое поле  $\vec{E}$  в лабораторной системе есть векторная сумма электрического поля  $\vec{E}' = \frac{E'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  и перпендикулярного к нему поля  $\vec{E}_H = \frac{[\vec{v} \cdot \vec{H}]}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , где  $v$  — скорость потока энергии в лабораторной системе координат. Соответственно и магнитное поле  $\vec{H}$  является суперпозицией взаимоперпендикулярных полей  $\vec{H}_H$  и  $\vec{H}_{E'}$ .

Полученное выражение для скорости потока электромагнитной энергии находится в согласии с релятивистским законом сложения скоростей.

Любая заряженная частица, взаимодействующая с потоком, должна увлекаться им и в конечном итоге приобретать скорость увлекającego ее потока. Показано, что такое совпадение вычисленной скорости потока и асимптотической скорости частицы

имеет место. Причина этого лежит в том, что, приобретя скорость в направлении потока, равную его скорости, частица или совокупность частиц (например, электронов проводимости обмотки якоря электрической машины) будут находиться в коллинеарных  $\vec{E}'$  и  $\vec{H}'$  полях, которые уже не могут создать силы, ускорившей бы эти частицы в направлении, перпендикулярном к полям, т.е. в направлении потока энергии. Если частицы по какой-то причине приобрели скорость, превышающую скорость потока, то относительно них возникнет поток энергии обратного направления и они замедлятся до скорости, равной скорости потока.

Анализ работы электрической машины с независимым внешним возбуждением хорошо иллюстрирует развиваемую картину взаимодействия движущегося потока электромагнитной энергии в зазоре машины с обмоткой ее якоря, как в режиме разгона, так и в режиме генерации электрической энергии. Проведен анализ процесса тепловыделения в движущихся проводниках с током, помещенных в магнитное поле, с точки зрения их кинематического взаимодействия с потоком энергии.

Из выражения для плотности энергии и плотности импульса движущейся сплошной среды, соответствующих компонентам (1,4) и (4,4) тензора энергии-импульса, следует, что плотность энергии в потоке  $W_n$  и плотность энергии  $W$  не должны совпадать (см., например, П.Г. Бергман, Введение в теорию относительности. Гос. изд. физико-математической литературы, Москва, 1947 г.):

$$S_x = T^{14} = \frac{W' + t''}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot v = W_n \cdot v; \quad W = T^{44} = \frac{W' + t'' \cdot \frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

8

$$W_n = W + t''$$

где  $W'$  - плотность энергии в собственной системе координат потока, движущегося со скоростью  $v$  относительно лабораторной системы, а  $t''$  - член, учитывающий натяжения в среде и соответствующий давлению вдоль оси  $x$ . Из приведенных выражений для  $W_n$  и  $W$  следует, что плотность энергии  $W_n$  в потоке подчиняется трансформационному закону Эйнштейна  $W_n = W_{n0} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , т.е. действительно является кинематической характеристикой движущейся сплошной среды. Из этих общих соотношений следует выражение для плотности энергии в потоке электромагнитной энергии, т.к. в этом случае  $W' = t'' = \frac{\epsilon'^2 + H'^2}{8\pi}$ :

$$W_n = \frac{1}{4\pi} \frac{\epsilon'^2 + H'^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{\epsilon^2 + H^2}{8\pi} + \frac{\epsilon'^2 + H'^2}{8\pi} = W + W'$$

Энергия  $W_n \Delta V$  и импульс  $\mathcal{P} = p \Delta V$  заключенные в объеме  $\Delta V$  движущегося со скоростью  $v$  элемента, в рассматриваемой точке потока энергии являются координатами 4-х вектора энергии - импульса, квадрат которого является инвариантом:

$$\mathcal{P}^2 c^2 - W_n^2 = -W_{n0}^2 = \text{inv.}$$

Приведенное выше выражение для скорости потока электромагнитной энергии в четырехмерной символике может быть записано в виде:

$$\vec{u} = \left( \frac{v_i}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \frac{ic}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

9

Квадрат скорости  $\vec{u}$  потока энергии также, как и квадрат 4-х вектора энергии-импульса, является инвариантом (см. Л.Д.Ландау и Е.М. Лифшиц, Теория поля. Гос.изд. Физико-математической литературы, М., 1960 г.).

Развитая кинематическая картина движения потока энергии, создаваемого перемещающимся сферически симметричным электрическим зарядом, позволяет естественным образом объяснить отличие в  $4/3$  раза кинетической массы движущегося электрона от его электростатической массы (см. А.Зоммерфельд. Электродинамика, Изд. иностранной литературы, М., 1958г.).

В 3 главе диссертации рассмотрен ранее не исследовавшийся аспект явления униполярной индукции, заключающийся в том, что при вращении постоянного магнита или соленоида с током вокруг оси симметрии в пространстве вокруг него возникает поле силы Лоренца (см. И.Е. Тами, Основы теории электричества, Гостехиздат, 1966 г.; об опытных исследованиях см. также:

*Reulos R. Courant magnetique et relativite- Nouvelle theorie des machines unipolaires, "Archiv. Scienties", 1957, 10, №4, p.545-573;*  
*Gupta A.K. Unipolar machines. Assotiation of the magnetic field with the fieldproducing magnet. "Amer. J. Phys", 31, №6, 1963),*

поток которого через замкнутую поверхность, окружающую вращающийся магнит, зависит от его скорости вращения, являясь инвариантной величиной. Если в системе, жестко связанной с магнитом, поток поля силы Лоренца всегда отсутствует, то в любой другой

системе он оказывается отличным от 0. Подсчет величины потока поля силы Лоренца в общем случае показывает, что он равен сумме возникающих с плотностью  $\rho = \frac{1}{c^2}(\vec{v} \cdot \vec{j})$  кажущихся "избыточных зарядов" на всех элементарных, движущихся со скоростью  $\vec{v}$  и обладающих плотностью тока  $\vec{j}$ , участках вращающейся производной цепи с током. В частном случае вращающегося вокруг оси симметрии элементарного кольца или прямого соленоида с током все его элементы обладают постоянной и отличной от 0 дивергенцией поля силы Лоренца во всех системах координат, вращающихся вокруг оси симметрии относительно кольца или соленоида (см. Э.А. Меерович. Методы релятивистской электродинамики в электротехнике, Изд. "Энергия" М.-Л. 1966 г.).

Доказано, что возникновение потока поля силы Лоренца вытекает из закона сохранения электрического заряда и является следствием релятивистского сокращения расстояний между вращающимися по круговой траектории элементарными электрическими зарядами. Неинвариантность потока поля силы Лоренца обусловлена неодновременным измерением расстояний в собственной системе координат вращающихся зарядов, всегда охватывающим большее расстояние между двумя событиями по сравнению с тем же расстоянием, измеренным одновременно в любой системе координат, в том числе и лабораторной. Показано, что наблюдаемое изменение концентраций движущихся по замкнутой круговой траектории с различными скоростями зарядов не должно происходить в собственной системе координат этих зарядов, а происходит в любой другой системе, вращающейся относительно собственной, что следует из общей теории относительности (см. А. Эйнштейн, Формальные основы общей теории относительности. Собрание научных трудов,

том I, Изд. "Наука", М., 1965 г.) и связано, в частности, с экспериментально обоснованным фактом изменения времени жизни вращающегося по круговой орбите мезона и неизменности этого времени в его собственной системе координат (см. Farby F. J., Bailey J., Picasso E. *Experimental verifications of the theory of relativity*. "Nature", 217, № 5123, 1968, а также У.И. Франкфурт. Специальная и общая теория относительности, Изд. "Наука" М., 1968 г.).

Дальнейшее развитие рассматриваемого вопроса приводит к заключению, что при возбуждении тока в изолированных неподвижных проводниках поток поля силы Лоренца не возникает лишь в единственной системе координат, относительно которой как положительные заряды решетки проводника, так и отрицательные электроны проводимости, движутся с одинаковой кинематической скоростью в противоположных направлениях. Во всех остальных системах, вращающихся относительно указанной, возникает поток поля силы Лоренца  $\mathcal{F}$ , величина которого, в лабораторной системе зависит квадратично от скорости движения электронов по проводнику и пропорциональна полному количеству электронов проводимости металла:

$$\mathcal{F} = \frac{1}{4\pi e} \oint \vec{j}_n \cdot d\vec{s} = q_e \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \approx \frac{1}{2} q_e \frac{v^2}{c^2}$$

Если индуктивно возбудить ток в изолированном замкнутом проводнике <sup>и</sup> замкнуть его на землю, то в замыкающей цепи под влиянием силы Лоренца пройдет отрицательный импульс тока. В проводнике с током будет больше положительных зарядов по

сравнению с отрицательными на величину  $\mathcal{F}$ . Заставляя ток в проводнике затухнуть и замкнув его вторично на землю, можно обнаружить протекание положительного импульса тока через закорачивающий проводник. Поскольку явление зависит только от кинематического движения электронов проводимости, оно не зависит от природы проводника и может быть обнаружено, в частности, в сверхпроводниках (см. Этгимани. Поля токонесущего провода, "Pr. of the JEE", январь 1966 г.). Измерение потока  $\mathcal{F}_{\text{пор}}$  и величины тока в проводниках позволяет создать новую методику исследования проводящих материалов и сплавов - полевого бесконтактного измерения в данном конкретном проводнике концентрации электронов проводимости и их средней скорости:

$$q_{\text{епор}} = \frac{\gamma^2}{2c^2 \mathcal{F}_{\text{пор}}}, \quad v = \frac{2c^2 \mathcal{F}_{\text{пор}}}{\gamma}$$

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. В.И. Докучаев. Явление униполярной индукции и эффект возникновения эквивалентного электрического "заряда". Министерство высшего и среднего специального образования СССР, МАИ им. С. Орджоникидзе, доклады конференции по теме "Униполярные электрические машины", Изд. Информэлектро, М., 1969 г.

2. В.И. Докучаев. Кинематика движущегося потока электромагнитной энергии, доклады, прочитанные на заседаниях секции физики в мае - июне 1966г. Издательство сборника: МОИП-Горный институт М., 1967г.

3. В.И. Докучаев, Об эффекте возникновения "Избыточного электрического заряда", Радиозлектроника летательных аппаратов, физический раздел, №1, 1970г. Издательство Харьковского Государственного Университета.

4. В.И. Докучаев, Д.В. Лазебник. Явление возникновения "избыточного" электрического поля в пространстве вокруг движущихся проводников с током. Материалы докладов УП конференции молодых специалистов Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики, Издательство ВНИИЭМ, М., 1967г.

5. Н.Е. Заев, В.И. Докучаев, О поведении линий поля вращающегося магнита, ж. Электричество, № 5, 1963 г.

Д л я   з а м е т о к