

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Сидоренков  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Известно [1], что в теории электричества базовой физической характеристикой материального тела является его электрический заряд, представление о котором на микроуровне имеет принципиальное дополнение: элементарная частица характеризуется не только зарядом  $q$ , кратным заряду электрона  $|e^-|$ , но и спином  $s$ , трактуемым как собственный момент количества движения частицы, величина которого квантована значением  $\hbar/2$ , где  $\hbar$  - постоянная Планка. Таким образом, локальными (корпускулярными) электромагнитными характеристиками микрочастицы являются *электрический заряд*, определяющий ее электрические свойства и *собственный момент*, ответственный за ее магнитные свойства, поскольку истинный магнетизм имеет спиновую природу.

С другой стороны, обратим внимание на основополагающую аксиому философии: *«пространство и время есть формы существования материи»*, означающую невозможность в принципе существования материи вне пространства и времени, соответственно, реализации пространства и времени без материи. Иными словами, характеристики материи и пространства-времени едины и взаимно обусловлены. По нашему мнению, аксиома концептуально обосновывает реальность корпускулярно-полевого дуализма материи, который, казалось бы, отличен только лишь по названию от «корпускулярно-волнового дуализма» частиц микромира в квантовой механике. Формально и здесь и там имеем неразрывную взаимосвязь материи с ее пространственно-временным собственным полем. Однако сущностные различия принципиальны: представления корпускулярно-полевого дуализма основаны на объективном единстве частицы материи и ее поля в реальном пространстве физического вакуума, а в концепции корпускулярно-волнового дуализма материальная частица представляется волной вероятности в абсолютно пустом, абстрактном пространстве.

На базе этой логики приходим к выводу, что и электромагнитные характеристики микрообъектов должны обладать «корпускулярно-полевым дуализмом», благодаря которому указанным выше локальным параметрам частицы соответствует некий полевой аналог в виде ее собственного первичного поля. Такой вывод вовсе не так тривиален, как может показаться на первый взгляд,

ведь он относится не к известному *электромагнитному полю* силового взаимодействия зарядов друг с другом на расстоянии, а к иному, далеко не очевидному, *первичному полю* микрочастицы. Более конкретно пока можно лишь сказать, что если такое поле действительно реально, то оно обязательно должно быть функционально связано с обычным векторным электромагнитным полем. По этой причине полагаем первичное поле также векторным, где электрическая вектор-компонента  $A^e$  порождена зарядом микрочастицы  $q$ , а магнитная компонента  $A^m$  - удельным (на единицу заряда) моментом  $n(h/2e)$ , кратным ( $n$  - натуральное число) кванту магнитного потока [1]. А поскольку электрический заряд и спин выявляются опосредовано измерением характеристик электромагнитного поля, то физически логично считать, что и компоненты первичного поля предполагаемых корпускулярно-полевых пар будут также определяться посредством того же электромагнитного поля.

Как видим, наша основная задача - разобраться далее, что должно представлять собой такое поле, каким образом можно аналитически описать его физические свойства и в итоге аксиоматически построить уравнения функциональной взаимосвязи компонент этого гипотетического поля  $A^e$  и  $A^m$  с реально наблюдаемыми в настоящее время компонентами электромагнитного поля в виде электрической  $E$  и магнитной  $H$  напряженностей.

Можно попытаться уже сейчас поставить вопрос, каким должно быть обсуждаемое первичное поле. Например, известен физически интересный факт, что в волновое уравнение квантовой механики (уравнение Шрёдингера) входит поле векторного магнитного потенциала, которое в принципе не может быть заменено полем вектора магнитной индукции. Вполне возможно, что именно электрическая и магнитная компоненты поля векторного потенциала и есть первичные полевые характеристики микрочастицы, полевой эквивалент ее локальных параметров. Однако сегодня о физических свойствах электромагнитного векторного потенциала известно сравнительно мало, да и вообще пока не ясно, соответствует ли данное предположение действительности. Все это и многое другое мы должны выяснить в процессе проводимых исследований.

Итак, продолжим наши рассуждения. Поскольку компоненты обсуждаемого гипотетического первичного поля есть векторные функции пространственно-временных переменных, то описывающие их поведение дифференциальные уравнения наиболее просто можно получить действием на  $A^e(\mathbf{r}, t)$  и  $A^m(\mathbf{r}, t)$  пространственной производной первого порядка (оператор «набла»)

$\nabla$  со свойствами вектора и скалярной частной временной производной  $\partial / \partial t$ . При этом естественно возникает принципиальный вопрос о допустимости именно таких математических действий с точки зрения физического содержания получаемых результатов, их адекватности рассматриваемой проблеме.

В сложившейся ситуации воспользуемся чрезвычайно важным замечанием классика электродинамики Дж.К. Максвелла, который настоятельно призвал [2] ответственно относиться к математическим операциям над векторами электромагнитного поля и их физической трактовке. Вот его слова ([2] п. 12): *“В науке об электричестве электродвижущая и магнитная напряженности принадлежат к величинам первого класса – они определены относительно линии. ... Напротив, электрическая и магнитная индукция, а также электрические токи принадлежат к величинам второго класса – они определены относительно площади”*. Как видим, тут конкретно говорится о принципиальных различиях электромагнитных векторов: напряженностей  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  – линейных (циркуляционных) векторов, соответственно, электрической  $\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$  и магнитной  $\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}$  индукций, плотности электрического тока  $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$  – потоковых векторов. Здесь материальные параметры среды:  $\epsilon\epsilon_0$  – электрическая и  $\mu\mu_0$  – магнитная абсолютные проницаемости,  $\sigma$  – удельная электропроводность.

В развитие сказанного далее Максвелл обсуждает корректные математические действия над функциями полей указанных векторов с точки зрения физики ([2] п. 14): *“В случае напряженности следует брать интеграл вдоль линии от произведения элемента длины этой линии на составляющую напряженности вдоль этого элемента. ... В случае потоков следует брать интеграл по поверхности от потока через каждый ее элемент”*. Тогда в рамках таких условий при переходе к дифференциальной форме записи этих математических действий операция «ротора» (см. теорему Стокса) допустима только для полевых функций линейных векторов:  $[\nabla, \mathbf{E}] \equiv \text{rot } \mathbf{E}$  и  $[\nabla, \mathbf{H}] \equiv \text{rot } \mathbf{H}$ , а взятие «дивергенции» (см. теорему Гаусса-Остроградского) возможно лишь от функций поля потоковых векторов:  $(\nabla, \mathbf{D}) \equiv \text{div } \mathbf{D}$ ,  $(\nabla, \mathbf{B}) \equiv \text{div } \mathbf{B}$  и  $(\nabla, \mathbf{j}) \equiv \text{div } \mathbf{j}$ .

К сожалению, призывы Максвелла к учету физико-математических различий функций векторов электромагнитного поля обычно игнорируют, когда даже в учебной литературе формально пишут физически бессмысленные выражения  $\text{div } \mathbf{E}$  и  $\text{rot } \mathbf{B}$ , создавая путаницу понятий в умах читателей, тем самым, превращая в абсурд процесс познания, а обучение – в бестолковое занятие. Как

показывает практика научной работы и преподавание все это следствие завидной живучести в умах самих «просветителей» (часто на подсознательном уровне) инородной электродинамике *гауссовой системы единиц* с ее безразмерными коэффициентами  $\varepsilon_0 = 1$  и  $\mu_0 = 1$ , где векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$  – тождественны. В итоге в соотношениях электромагнетизма выхолащивается физическое содержание и выпячивается на передний план формализм математики. Возможно, этот математический нигилизм и есть одна из причин концептуального застоя в классической электродинамике, которая после Максвелла как наука уже не развивалась, несмотря на серьезную методическую модернизацию исходных максвелловских уравнений и грандиозные успехи внедрения достижений электромагнетизма во многих областях жизни человеческого общества.

Странно, но сложившееся положение дел считается нормальным. Более того, повсеместно с помпой утверждается, что «данная область знания наиболее полно разработана во всех ее аспектах, и настоящий ее уровень является вершиной человеческого гения». Однако надо думать, что эти громкие заявления, конечно, не относятся собственно к самой электромагнитной теории, а касаются только математического уровня ее описания. Ведь *математика - всего лишь язык физики*. Правда, полезная глобальная математизация современных методов научных исследований порождает иллюзию, что именно уровень развития математики определяет сегодня прогресс наших знаний о Природе. Надо обладать немалым мужеством и веской аргументацией, чтобы в стремлении конструктивно изменить такую, казалось бы, тупиковую ситуацию во всеуслышание утверждать: *физические представления классического электромагнетизма – это концептуально недостаточно исследованная область естествознания*.

Итак, рассмотрим действие оператора «набла» и частной временной производной на векторные функции обсуждаемого здесь гипотетического поля. Так как для потоковых векторов, следуя здравой логике Максвелла, операция «ротора» недопустима, то функции  $\mathbf{A}^e(\mathbf{r}, t)$  и  $\mathbf{A}^m(\mathbf{r}, t)$  считаем полями *линейных* векторов. В этом случае мы получим два (из трех возможных) варианта записи действия указанных операторов:  $\text{rot } \mathbf{A}^e$  и  $\text{rot } \mathbf{A}^m$ ,  $\partial \mathbf{A}^e / \partial t$  и  $\partial \mathbf{A}^m / \partial t$ . А преобразование линейных векторов  $\mathbf{A}^e$  и  $\mathbf{A}^m$  в потоковые  $\mu\mu_0 \mathbf{A}^e$  и  $\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m$ , аналогичные потоковым векторам  $\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}$  и  $\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}$ , описывающим отклик пространства среды на воздействие этих полей, позволяет записать другой, скалярный результат действия оператора «набла»:  $\text{div } (\mu\mu_0 \mathbf{A}^e)$  и  $\text{div } (\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m)$ .

Эти выражения используем далее для физико-математического построения соотношений функциональной связи компонент гипотетического первичного поля  $A^e$  и  $A^m$  с компонентами электромагнитного поля в виде электрической  $E$  и магнитной  $H$  напряженностей. Поскольку взятие ротора функции поля линейного вектора дает функцию потокового вектора, то, дабы удовлетворить априорным требованиям взаимосвязи указанных полей, физически логично считать, что циркуляция векторов  $A^e$  и  $A^m$  первичного поля обусловлена явлением электрической  $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$  и магнитной  $B = \mu\mu_0 H$  поляризации среды:

$$(a) \quad \text{rot } A^e = \varepsilon\varepsilon_0 E, \quad (b) \quad \text{rot } A^m = \mu\mu_0 H. \quad (1)$$

Здесь предполагается, что компонента  $A^e$  поля микрочастицы есть полевой эквивалент ее электрического заряда, создающего электрическое поле, а компонента  $A^m$  порождается спином частицы, ответственным за магнитное поле.

В соотношениях (1) ротор функций не равен нулю, что говорит о том, что компоненты первичного поля  $A^e$  и  $A^m$  являются *вихревыми*. По этой причине дивергентные уравнения для указанных полевых компонент запишем в виде соотношений кулоновской калибровки, определяющих математически чисто вихревой характер таких полей:

$$(a) \quad \text{div } (\mu\mu_0 A^e) = 0, \quad (b) \quad \text{div } (\varepsilon\varepsilon_0 A^m) = 0. \quad (2)$$

Поскольку действие скалярного оператора частной временной производной  $\partial/\partial t$  на векторную функцию не меняет ее геометрические свойства, то получаемые при этом новые векторы  $\partial A^e/\partial t$  и  $\partial A^m/\partial t$  останутся линейными (циркуляционными) векторами. А потому функциональная связь полей  $\partial A^e/\partial t$  или  $\partial A^m/\partial t$  возможна только с компонентами электромагнитного поля линейных векторов  $E$  и  $H$  напряженностей, причем для однозначного выбора пар этих компонент надо учесть, что равенство векторов возможно только при их коллинеарности. В качестве существенного уточнения заметим, что, согласно соотношениям (1), векторы в парах  $A^e$  и  $E$ , соответственно,  $A^m$  и  $H$  взаимно ортогональны. Таким образом, с необходимостью приходим к соотношениям  $E = -\partial A^m/\partial t$  и  $H = \partial A^e/\partial t$ , которые, однако, нельзя считать окончательными. Ведь в наших рассуждениях никак не отражена принципиально важная характеристика материальной среды – ее электрическая проводимость  $\sigma$ , которой в той или иной мере обладают все реальные среды. А это должно определенно повлиять на окончательный вид данных выражений.

Как известно [1], процесс электропроводности описывается законом Ома  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ , где электрическое поле в проводнике с током потенциально:  $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ , то есть не может быть вихревым. Следовательно, полученное ранее соотношение  $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A}^m / \partial t$  является окончательным. Однако вихревое магнитное поле электрического тока существует. Это следует из  $\text{div } \mathbf{j} + \partial \rho / \partial t = 0$  - закона сохранения заряда, когда подстановки в него выражений закона Ома  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ , теоремы Гаусса  $\text{div}(\epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho$  и соотношения (1a) дают  $\text{rot } \mathbf{H} = \text{rot}(\mathbf{A}^e / \tau_{\text{рел}} + \partial \mathbf{A}^e / \partial t)$ , где  $\rho$  - объемная плотность стороннего заряда, а  $\tau_{\text{рел}} = \epsilon \epsilon_0 / \sigma$  - постоянная времени релаксации заряда в среде за счет ее электропроводности. В итоге искомые соотношения для вихревых  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  полей запишутся окончательно:

$$(a) \quad \mathbf{E} = -\partial \mathbf{A}^m / \partial t, \quad (b) \quad \mathbf{H} = \mathbf{A}^e / \tau_{\text{рел}} + \partial \mathbf{A}^e / \partial t. \quad (3)$$

Таким образом, собирая полученные в наших физико-математических рассуждениях соотношения (1) - (3) вместе, приходим к системе дифференциальных уравнений функциональной связи компонент гипотетического поля  $\mathbf{A}^e$  и  $\mathbf{A}^m$  с реально наблюдаемыми в настоящее время компонентами электромагнитного поля в виде электрической  $\mathbf{E}$  и магнитной  $\mathbf{H}$  напряженностей:

$$(a) \quad \text{rot } \mathbf{A}^e = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (b) \quad \text{div}(\mu \mu_0 \mathbf{A}^e) = 0, \quad (c) \quad \mathbf{H} = \frac{\mathbf{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t},$$

$$(d) \quad \text{rot } \mathbf{A}^m = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (e) \quad \text{div}(\epsilon \epsilon_0 \mathbf{A}^m) = 0, \quad (g) \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t}. \quad (4)$$

Как видим, данная система уравнений (4) описывает свойства необычного с точки зрения традиционных представлений вихревого векторного электродинамического поля, состоящего из четырех неразрывно связанных векторных компонент  $\mathbf{A}^e$ ,  $\mathbf{A}^m$ ,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , которое условно можно назвать реальное электромагнитное поле.

Убедимся теперь, что свойства функций компонент полей в нашей системе уравнений действительно отвечают концепции корпускулярно-полевого дуализма электромагнитных характеристик материи, благодаря которому конкретному локальному параметру частицы соответствует свой полевой аналог в виде собственного первичного поля. Вначале рассмотрим электрическую компоненту  $\mathbf{A}^e$  первичного поля, причем для большей наглядности и математической общности представим соотношение (4a) в интегральной форме:

$$\oint_C \mathbf{A}^e d\mathbf{l} = \int_{S_C} \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E} dS = \Phi^e = \int_{S_C} \sigma' dS = q'. \quad (5)$$

Эти интегральные соотношения устанавливают физически содержательное положение о том, что величина циркуляции вектора  $\mathbf{A}^e$  по произвольному замкнутому контуру  $C$  определяется электрическим потоком  $\Phi^e$  через поверхность  $S_C$ , опирающуюся на этот контур, то есть *поляризационным электрическим зарядом*, индуцированным на указанной поверхности. Отсюда, в частности, следует определение поля вектора электрического смещения  $\mathbf{D}$ , по величине равного поверхностной плотности поляризационного заряда  $\sigma'$  на пробной площадке, ориентация которой в данной точке создает на ней максимальное значение этого заряда, а нормаль к площадке указывает направление вектора  $\mathbf{D}$ . Определение  $\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$  как потокового вектора показывает его принципиальное отличие от линейного (циркуляционного) вектора напряженности  $\mathbf{E}$ , являющегося силовой характеристикой электрического поля.

Таким образом, согласно соотношению (5), *электрическому заряду*  $q'$  отвечает его полевой эквивалент - *электрическая* векторная компонента  $\mathbf{A}^e$  *первичного поля*, размерность которого *линейная плотность электрического заряда*. Итак, имеем реализацию *первой* фундаментальной корпускулярно-полевой пары  $q' \Leftrightarrow \mathbf{A}^e$  с единицами измерения в системе СИ  $\text{Кулон} \Leftrightarrow \text{Кулон/метр}$ .

Корпускулярно-полевые представления подтверждаются связью напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  и электрической компоненты  $\mathbf{A}^e$  первичного поля посредством соотношения (4с), имеющего в системе СИ единицу измерения  $\text{Ампер/метр}$ , а ведь это, как и должно быть, полевой эквивалент полного электрического тока  $J = J_{np} + J_{см}$  (токов проводимости и смещения), величина (сила тока) которого имеет единицу измерения Ампер. Как видим, соотношение (4с) для вихревых полей  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{A}^e$  представляет собой полевую составляющую корпускулярно-полевой пары  $\text{Ампер} \Leftrightarrow \text{Ампер/метр}$ , являющуюся очевидным прямым физическим следствием *первой* фундаментальной пары.

Перейдем теперь к магнитной компоненте  $\mathbf{A}^m$  первичного поля и проанализируем соотношения связи поля вектора  $\mathbf{A}^m$  с полями векторов магнитной индукции  $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$  (4d) и электрической напряженности  $\mathbf{E}$  (4g). Рассмотрим вначале соотношение (4d), которое представим в интегральной форме:

$$\oint_C \mathbf{A}^m d\mathbf{l} = \int_{S_C} \mu\mu_0 \mathbf{H} dS = \Phi^m. \quad (6)$$

Видно, что величина циркуляции вектора  $\mathbf{A}^m$  по контуру  $C$  определяется магнитным потоком  $\Phi^m$  через поверхность  $S_C$ , опирающуюся на этот контур, и имеет единицу измерения в СИ Вебер = (Джоуль·секунда)/Кулон, что соответствует модулю момента импульса на единицу заряда. При этом размерность магнитной компоненты  $\mathbf{A}^m$  первичного поля может быть двоякой: либо *импульс на единицу заряда*, либо ей альтернативная *линейная плотность момента импульса на единицу заряда*. Конечно, формально обе размерности вектора  $\mathbf{A}^m$ , выраженные через единицы измерения, математически тождественны: (Ньютон·секунда)/Кулон = (Джоуль·секунда)/(Кулон·метр), но такое равенство абсурдно физически, так как это принципиально различные величины.

Для нас здесь существенно то, что, согласно Максвеллу [2], в электромагнетизме линейные (циркуляционные) векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  имеют размерность *линейной плотности* физической величины, а потоковые векторы  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{j}$  – ее *поверхностной плотности*. В частности, размерность вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  равна поверхностной плотности момента импульса на единицу заряда в системе СИ Тесла = (Джоуль·секунда)/(Кулон·(метр·метр)). Экспериментально это убедительно и ярко иллюстрируется эффектом Эйнштейна-де Хааза [1], где в материальной среде при ее однородном намагничивании возникает механический момент вращения, направленный коллинеарно полю, обусловленный упорядочением под действием поля собственных магнитных моментов, соответственно, моментов количества движения электронов в атомах вещества среды. Следовательно, поле вектора  $\mathbf{B}$  определяется *моментом импульса* материальной среды, выявляющимся при ее намагничивании.

Поэтому, согласно соотношению (6), размерностью вихревого поля вектора  $\mathbf{A}^m$  следует считать *линейную плотность момента импульса на единицу заряда*. Итак, локальной характеристике микрочастицы - *моменту импульса на единицу заряда* - сопоставляется его полевой эквивалент - магнитная компонента  $\mathbf{A}^m$  первичного поля, что дает вторую фундаментальную корпускулярно-полевую пару, которую, например, конкретно для электрона можно записать как  $h/2e \Leftrightarrow \mathbf{A}^m$  с единицами измерения в системе СИ (Джоуль·секунда)/Кулон  $\Leftrightarrow$  (Джоуль·секунда)/(Кулон·метр).

Далее обратимся к соотношению (4g) связи векторов  $A^m$  и  $E$ , где вектор  $E$  определен производной по времени от момента импульса  $\partial A^m / \partial t$ . Тогда размерность вихревого поля электрической напряженности  $E$  однозначно равна *линейной плотности момента силы на единицу заряда*, что никоим образом не опровергает традиционные единицы измерения этого вектора *Вольт/метр* либо *Ньютон/Кулон*, а лишь уточняет его физический смысл. Таким образом, соотношение (4g) представляет собой полевой аналог *основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела* в механике, что согласуется с представлениями корпускулярно-полевого дуализма характеристик материи.

Логика требует, что если электродинамические уравнения (4), согласно реализованному здесь плану их построения, являются основополагающими в электромагнитной теории, то обязательным тривиальным следствием из них должна быть система традиционных уравнений Максвелла классической электродинамики для полей  $E$  и  $H$  напряженностей. И действительно, векторное действие оператора «набла» на соотношения (4с) и (4g) с подстановкой в этот результат соотношений (4а) и (4d), и, соответственно, скалярное действие оператора «набла» на (4а) и (4d) дают нам классические уравнения *электромагнитного поля* для случая сред с локальной электронейтральностью ( $\rho = 0$ ):

$$\begin{aligned} \text{(a) } \operatorname{rot} E &= -\mu\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, & \text{(b) } \operatorname{div} (\varepsilon\varepsilon_0 E) &= 0, \\ \text{(c) } \operatorname{rot} H &= \varepsilon\varepsilon_0 \left( \frac{E}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial E}{\partial t} \right), & \text{(d) } \operatorname{div} (\mu\mu_0 H) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В структуре этих уравнений заложена отражающая обобщение опытных данных основная аксиома классической электродинамики – неразрывное единство переменных во времени электрической и магнитной компонент электромагнитного поля, распространяющихся в свободном пространстве в виде поперечных волн. Уравнения (7) отвечают также на вопрос о переносе этими волнами электромагнитной энергии, закон сохранения которой аналитически сформулирован в так называемой теореме Пойнтинга:

$$H \operatorname{rot} E - E \operatorname{rot} H = \operatorname{div} [E, H] = -\sigma(E, E) - \varepsilon\varepsilon_0 E \frac{\partial E}{\partial t} - \mu\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (8)$$

Здесь поступающий извне поток энергии  $\operatorname{div} [E, H]$  компенсирует в данной точке среды джоулевы (тепловые) потери при электропроводности (первое слагаемое справа) и изменяет электрическую и магнитную энергии, либо наоборот.

Сделаем важное замечание. Полученные из более общей системы уравнений (4) уравнения Максвелла (7) отвечают на центральный вопрос наших исследований: *что представляет собой введенное на основе корпускулярно-полевого дуализма электромагнитных характеристик материи собственное первичное поле микрочастицы*. Ответ формулируется так: если дивергенция ротора любого векторного поля тождественно равна нулю, то из дивергентного уравнения (7b)  $\operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E})=0=\operatorname{div}\operatorname{rot}\mathbf{A}^e$  следует соотношение (4a), соответственно, из (7d)  $\operatorname{div}(\mu\mu_0\mathbf{H})=0=\operatorname{div}\operatorname{rot}\mathbf{A}^m$  имеем соотношение (4d), посредством которых вводят понятие именно компонент векторного электромагнитного потенциала. Таким образом, мы убедились, что *компоненты гипотетического первичного поля  $\mathbf{A}^e$  и  $\mathbf{A}^m$  действительно однозначно являются полями соответственно электрической и магнитной компонент векторного потенциала*, которые, как показано выше, а также, например, в [4], по их физическому смыслу есть полевые эквиваленты соответствующих локальных электромагнитных параметров частиц материи.

И еще важное. Из уравнений (4) также следуют структурно аналогичные системе (7) еще три системы уравнений для других пар вихревых компонент *реального электромагнитного поля*. Их можно получить действием оператора «набла» на соответствующие выражения в системе уравнений (4), аналогично выводу системы уравнений Максвелла (7). Уравнения в этих системах (см. работы [3, 4]) рассматривают такие области пространства, где присутствует либо только *поле электромагнитного векторного потенциала* с электрической  $\mathbf{A}^e$  и магнитной  $\mathbf{A}^m$  компонентами:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \operatorname{rot} \mathbf{A}^e &= -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t}, & \text{(b)} \quad \operatorname{div}(\mu\mu_0 \mathbf{A}^e) &= 0, \\ \text{(c)} \quad \operatorname{rot} \mathbf{A}^m &= \mu\mu_0 \left( \frac{\mathbf{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t} \right), & \text{(d)} \quad \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m) &= 0; \end{aligned} \quad (9)$$

либо *электрическое поле* с компонентами  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{A}^e$

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mathbf{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t} \right), & \text{(b)} \quad \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}) &= 0, \\ \text{(c)} \quad \operatorname{rot} \mathbf{A}^e &= \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}, & \text{(d)} \quad \operatorname{div}(\mu\mu_0 \mathbf{A}^e) &= 0; \end{aligned} \quad (10)$$

либо, наконец, *магнитное поле* с компонентами  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{A}^m$ .

$$\begin{aligned}
(a) \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} &= -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mathbf{A}^m}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t} \right), & (b) \quad \operatorname{div}(\mu\mu_0 \mathbf{H}) &= 0, \\
(c) \quad \operatorname{rot} \mathbf{A}^m &= \mu\mu_0 \mathbf{H}, & (d) \quad \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m) &= 0.
\end{aligned} \tag{11}$$

Как и следовало ожидать, из этих новых систем электродинамических уравнений аналогично выводу формулы (8) непосредственно получаем соотношения баланса: для *потока момента ЭМ импульса* из уравнений системы (9)

$$\operatorname{div}[\mathbf{A}^e, \mathbf{A}^m] = -\frac{\mu\mu_0}{\tau_{\text{рел}}}(\mathbf{A}^e, \mathbf{A}^e) - \mu\mu_0 \mathbf{A}^e \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t} - \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m \frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t}, \tag{12}$$

для *потока электрической энергии* из уравнений системы (10)

$$\operatorname{div}[\mathbf{E}, \mathbf{A}^e] = -\varepsilon\varepsilon_0(\mathbf{E}, \mathbf{E}) - \mu\mu_0 \mathbf{A}^e \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mathbf{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t} \right) \tag{13}$$

и, наконец, для *потока магнитной энергии* из уравнений системы (11)

$$\operatorname{div}[\mathbf{H}, \mathbf{A}^m] = -\mu\mu_0(\mathbf{H}, \mathbf{H}) - \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{A}^m \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mathbf{A}^m}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t} \right). \tag{14}$$

Поскольку *дивергенция* по определению есть объемная плотность потока векторного поля в данной точке, то соотношения баланса (8) и (12) - (14) показывают, что наличие (соответственно, изменение) определенной величины энергии или момента импульса в рассматриваемой точке невозможно в отрыве от окружающего пространства, без взаимодействия с ним посредством потоковой связи извне. Существенно, что это не является чем-то специфическим или необычным. Вот, например, тривиально наглядная ситуация: растянутая руками пружина, где ее внутренняя энергия упругой деформации создается и существует только за счет взаимодействия с окружением (действия рук). Итак, именно соотношения баланса, являющиеся следствием систем уравнений (7) и (9) - (11), однозначно иллюстрируют реальность корпускулярно-полевого дуализма характеристик материи, использование концепции которого позволило построить систему электродинамических уравнений (4) первичной функциональной взаимосвязи теперь уже конкретно компонент *поля электромагнитного векторного потенциала* и *электромагнитного поля*, тем самым поднять на новый концептуальный уровень физические представления полевой теории классического электромагнетизма.

Таким образом, аргументированно показано, что в Природе объективно существует необычное с точки зрения традиционных представлений четырёх-векторное вихревое поле в виде совокупности функционально неразрывно связанных между собой полевых компонент  $A^e$ ,  $A^m$  и  $E$ ,  $H$ . Относительно наблюдения его физических проявлений такое поле реализуется четверкой составляющих его электродинамических полей из пар вышеуказанных компонент. Здесь *поле электромагнитного векторного потенциала* с компонентами  $A^e$  и  $A^m$  описывается системой уравнений (9), *электромагнитное поле* с  $E$  и  $H$  - системой (7), *электрическое поле* с  $E$  и  $A^e$  - системой (10), наконец, *магнитное поле* с  $H$  и  $A^m$  - системой (11). Именно такие структурные образования из двух векторных взаимно ортогональных полевых компонент делают принципиально возможным перемещение в пространстве конкретного электродинамического поля в виде потока соответствующей физической величины (см. соотношения (8), (12) - (14)). Подробно характеристики и специфика распространения волн таких полей рассмотрены, например, в работе [5].

Как видим, описывающие все эти поля электродинамические соотношения (4) объективно составляют фундамент классической электродинамики и являются основополагающими первичными уравнениями электромагнитного поля, где система традиционных уравнений электродинамики Максвелла - это всего лишь рядовое частное следствие.

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Наука, 1989.
2. Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. Том I и II. - М.: Наука, 1989.
3. Сидоренков В.В. Обобщение физических представлений о векторных потенциалах в классической электродинамике // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2006. № 1. - С. 28-37.
4. Сидоренков В.В. Фундаментальные основы электродинамической теории нетеплового действия электромагнитных полей на материальные среды // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 11. - С. 75-82.
5. Сидоренков В.В. Реальная структура электромагнитного поля и характеристики распространения его составляющих // Материалы X Международной конференции «Физика в системе современного образования». - Санкт-Петербург: РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. Том 1. - С. 114-117.