

ВЕКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ - ЭТО ПЕРВИЧНОЕ ИСТИННОЕ ПОЛЕ ЧАСТИЦ МИКРОМИРА

В.В. Сидоренков
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Фундаментальность закона Природы «корпускулярно-полевого дуализма Материи» состоит в том, что как две стороны одной медали электромагнитные локальные характеристики микрочастицы и ее собственные полевые параметры неразрывно связаны и обусловлены друг другом: электрическому заряду, кратному кванту электрического потока - заряду электрона, соответствует электрический векторный потенциал, а удельному (на единицу заряда) моменту, кратному кванту магнитного потока, отвечает магнитный векторный потенциал.

Полевая концепция природы электричества является фундаментом классической электродинамики и основана на признании того факта, что взаимодействие разнесенных в пространстве электрических зарядов осуществляется посредством электромагнитных полей. Физические свойства таких *полей взаимодействия* математически описываются системой функционально связанных между собой уравнений в частных производных первого порядка, называемых электродинамическими уравнениями Максвелла [1, 2]. В структуре этих уравнений, описывающих поведение электромагнитного поля в неподвижной среде, заложена аксиома классической электродинамики - неразрывное единство переменных во времени электрического и магнитного полей. В современной форме такая система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, & \text{(б)} \quad \operatorname{div} \vec{D} &= \rho, & (1) \\ \text{(в)} \quad \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, & \text{(г)} \quad \operatorname{div} \vec{B} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь соответственно поля: векторов электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} напряженности, электрической $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ и магнитной $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ индукции, плотности электрического тока $\vec{j} = \sigma \vec{E}$; абсолютные $\epsilon \epsilon_0$ и $\mu \mu_0$ - электрическая и магнитная проницаемости, σ - удельная электрическая проводимость материальной среды, а ρ - объемная плотность стороннего электрического заряда.

Важнейшим фундаментальным следствием уравнений Максвелла является тот факт, что \vec{E} и \vec{H} компоненты электромагнитного поля распространяются в пространстве в виде волн. Например, из (1а) и (1в) сравнительно просто получить волновое уравнение для поля электрической напряженности \vec{E} :

$$\text{rot rot } \vec{E} = \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{H} = -\sigma\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Аналогично получается и уравнение волн поля магнитной напряженности \vec{H} , структурно тождественное уравнению (2). Видно, что скорость распространения этих волн определяется только лишь электрическими и магнитными параметрами пространства материальной среды: ε , μ и σ . В частности, в отсутствие поглощения ($\sigma = 0$) их скорость распространения $v = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$, а колебания \vec{E} и \vec{H} компонент волн, согласно структуре уравнений (1), синфазны.

С целью ответа на вопрос, что переносят эти волны, воспользуемся уравнениями Максвелла (1), являющимися, в сущности, первичными уравнениями электромагнитной волны, откуда на основе уравнений (1а) и (1в) получаем *закон сохранения энергии* в форме, так называемой теоремы Пойнтинга:

$$\vec{H} \text{rot } \vec{E} - \vec{E} \text{rot } \vec{H} = \text{div} [\vec{E}, \vec{H}] = -(\vec{j}, \vec{E}) - \vec{E} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \vec{H} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (3)$$

Видно, что поступающий извне в данную точку среды поток электромагнитной энергии за единицу времени (мощности), определяемый вектором Пойнтинга $[\vec{E}, \vec{H}]$, идет на компенсацию джоулевых (тепловых) потерь в процессе электропроводности и изменение электрической и магнитной энергий, либо наоборот (3) - эти физические процессы вызывают излучение наружу потока электромагнитной мощности. При этом совокупное наличие в пространстве \vec{E} и \vec{H} полей вызывает отклик материальной среды в виде векторного *поля объемной плотности электромагнитного импульса*: $\vec{g}(\vec{r}) = [\vec{D}, \vec{B}]$. Экспериментальное открытие *импульса электромагнитного поля* (давление света) [3] принадлежит русскому ученому-физику П.Н. Лебедеву (1899г.).

Однако наряду с этим, следует указать на весьма ограниченный диапазон явных возможностей уравнений Максвелла при описании ряда известных в настоящее время явлений электромагнетизма. В частности, уравнения (1) не могут вскрыть и адекватно описать физическую суть магнитных явлений, поскольку известно [2], что истинный магнетизм – это спиновый магнетизм. Например, они в принципе не способны объяснить *эффект Эйнштейна-де Гааза* [1, 2], когда в материальной среде при ее однородном намагничивании возника-

ет механический момент вращения, направленный коллинеарно подмагничивающему полю магнитной индукции \vec{B} . Так же далеко не ясен вопрос о существовании и физической реализации *момента импульса электромагнитного поля*, соответственно, переносящих его волн.

Здесь как бы существует парадокс, где с одной стороны, теория Максвелла предсказывает равенство нулю момента импульса плоской электромагнитной волны, а, с другой, физически понятно, что электромагнитное излучение – это излучение возбужденными атомами избытка энергии в виде фотонов, которые будут забирать от атома не только часть энергии, но и уносить долю внутреннего углового момента атома. Следовательно, распространяющееся в виде волн электромагнитное поле должно обладать вполне определенной величиной момента импульса, что, кстати, наблюдалось в экспериментах [4, 5].

Таким образом, принципиальный дефект традиционной классической электродинамики в том, что в ее представлениях об электрическом заряде и его поле отсутствует понятие о спине (собственном моменте импульса). Ссылки на ныне существующую *квантовую электродинамику* [2] неуместны, поскольку это отдельная самостоятельная наука, по сути несвязанная с классической теорией. Правда, известны попытки введения в электродинамику так называемого *классического спина* [6], но и они оказались неконструктивными.

К сожалению, несмотря на серьезную методическую модернизацию исходных максвелловских уравнений Герцем, Хевисайдом и Эйнштейном и грандиозные успехи внедрения достижений электромагнетизма во многих областях жизни современного человеческого общества, общепринятая на сегодня теория электромагнитного поля и поныне базируется только лишь на представлениях 19 века о физических свойствах электрического заряда материальных тел. Для аргументированной иллюстрации данного факта здесь вполне достаточно двух первичных фундаментальных соотношений электромагнетизма - *закона Кулона силы взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов* и *закона сохранения электрического заряда* [1], чтобы цепочкой последовательных физико-математических рассуждений построить традиционную систему (1) уравнений электродинамики Максвелла [7].

Но это только то, что лежит на поверхности. Если взглянуть глубже, то те же дивергентные уравнения системы (1) содержат сведения о полях электрического \vec{A}^e и магнитного \vec{A}^m векторных потенциалов, физический смысл которых, несмотря на вполне определенный прогресс в установлении их физической значимости [8], и по сей день концептуально не понят, а потому в теории электромагнетизма эти не наблюдаемые напрямую поля остаются в долж-

ной мере непринятыми и, в сущности, неиспользуемыми. Попробуем еще раз разобраться в этом вопросе, для чего воспользуемся обсуждаемой здесь системой уравнений (1).

Представления о векторных потенциалах определяются очевидным положением о том, что дивергенция ротора любого векторного поля \vec{a} тождественно равна нулю: $\text{div rot } \vec{a} = 0$. Поэтому магнитную компоненту векторного потенциала \vec{A}^m можно ввести посредством соотношения $\text{div } \vec{B} = 0$ системы уравнений (1), описывающим магнитную поляризацию (намагниченность) материальной среды, а электрическую компоненту \vec{A}^e - соотношением $\text{div } \vec{D} = 0$, описывающим поляризацию локально электронейтральной ($\rho = 0$) среды:

$$(a) \quad \text{rot } \vec{A}^m = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (b) \quad \text{rot } \vec{A}^e = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}. \quad (4)$$

Таким образом, с точки зрения физического смысла векторные электромагнитные потенциалы непосредственно связаны с электрической и магнитной поляризациями, а потому их можно называть *поляризационными потенциалами*.

Тогда подстановка соотношения для магнитного векторного потенциала (4а) в уравнение вихря электрической напряженности (1а) приводит к известной формуле связи поля вектора указанной напряженности с магнитным векторным потенциалом [1]:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t}, \quad (5)$$

описывающей закон электромагнитной индукции Фарадея. Здесь электрический скалярный потенциал: $\vec{E} = -\text{grad } \varphi^e$ принципиально не рассматривается, как не имеющий отношения к обсуждаемым в работе вихревым полям.

При аналогичной подстановке соотношения для электрического векторного потенциала (4б) в уравнение вихря магнитной напряженности (1в) с учетом закона Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ получаем в итоге связь этой напряженности с указанным векторным потенциалом:

$$\vec{H} = \frac{\vec{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t}. \quad (6)$$

Здесь $\tau_{\text{рел}} = \varepsilon\varepsilon_0 / \sigma$ - постоянная времени релаксации электрического заряда в среде за счет ее электропроводности.

Однозначность функций векторных потенциалов, то есть чисто вихревой характер таких полей обеспечивается условием кулоновской калибровки:

$$(a) \quad \text{div } (\varepsilon\varepsilon_0 \vec{A}^m) = 0, \quad (b) \quad \text{div } (\mu\mu_0 \vec{A}^e) = 0, \quad (7)$$

где абсолютные электрическая $\varepsilon\varepsilon_0$ и магнитная $\mu\mu_0$ проницаемости, согласно соотношениям (5) и (6), соответствуют в формулах (7) конкретным компонентам векторного потенциала.

Как видим, векторные потенциалы принципиально сопровождают явления электрической и магнитной поляризаций материальной среды, причем, согласно (4), пары векторов \vec{H} и \vec{A}^m , \vec{E} и \vec{A}^e - взаимно ортогональны; соответственно, согласно (5) и (6), другие векторные пары \vec{E} и \vec{A}^m , \vec{H} и \vec{A}^e - взаимно коллинеарны. Покажем, что векторные потенциалы – это не математические фикции, а физически значимые фундаментальные поля, порождающие (см. соотношения (5) и (6)) традиционные вихревые электромагнитные поля.

Так как взаимодействие электрических зарядов реализуются посредством электрических \vec{E} и магнитных \vec{H} полей, то физически логично предположить, что порождающие такие поля векторные потенциалы \vec{A}^e и \vec{A}^m как физические величины есть первичные полевые характеристики самого электрического заряда и как вторая сторона медали есть его прямой полевой эквивалент. Для обоснования правомерности такого предположения рассмотрим конкретные аргументы, позволяющие разрешить проблему физического смысла компонент вектор-потенциала \vec{A}^e и \vec{A}^m , обсуждаемую для магнитного векторного потенциала еще Максвеллом при анализе своих электродинамических построений ([9] п. 590). Согласно точке зрения Максвелла, вектор \vec{A}^m “*может быть признан фундаментальной величиной в теории электромагнетизма*” [10].

Как известно, физические представления об электрическом заряде имеют на микроуровне существенное дополнение: элементарная частица характеризуется не только значением заряда q , кратного заряду электрона $|e^-|$, но и спином s , трактуемым как собственный момент количества движения частицы. Величина этого момента квантована значением $\hbar/2$, где $\hbar = h/2\pi$ - модифицированная постоянная Планка. То есть микрочастица принципиально обладает в неразрывной связи электрическим зарядом $q = n |e^-|$ и собственным магнитным моментом, кратным собственному (спиновому) магнитному моменту электрона - магнетону Бора [2]: в системе физических единиц СИ $m_B = e\hbar/2m_e$.

В соответствии с нашим предположением, сопоставим локальные характеристики микрочастицы и некое ее *собственное первичное электромагнитное поле*. Конкретно для *электрона* электрическая компонента этого поля соответствует заряду $|e^-|$ - кванту электрического потока, а магнитная компонента - удельному (на единицу заряда) моменту $h/2e$, определяющему, как известно [2], квант магнитного потока. Наша задача показать, что введенное здесь гипотеза

тетически собственное поле микрочастицы (совокупно, и макрообъекта) является именно полем векторных потенциалов.

Итак, вначале рассмотрим электрический векторный потенциал \vec{A}^e . Для этого соотношение (4б) связи электрических векторов индукции и векторного потенциала для большей наглядности и математической общности представим в интегральной форме:

$$\oint_C \vec{A}^e d\vec{l} = \int_{S_C} \vec{D} d\vec{S} = \int_{S_C} \sigma_{\text{поля}} dS = q_{\text{поля}} . \quad (8)$$

Эти интегральные соотношения устанавливают физически содержательное положение о том, что величина циркуляции вектора \vec{A}^e по замкнутому контуру C определяется потоком вектора электрического смещения \vec{D} через поверхность S_C , опирающуюся на этот контур, соответственно, поляризационным электрическим зарядом $q_{\text{поля}}$, индуцированным на этой поверхности. Отсюда следует *определение поля вектора электрического смещения \vec{D} , численно равного плотности заряда $\sigma_{\text{поля}}$ на пробной площадке, ориентация которой в данной точке создает на ней максимальное значение этого заряда: $D_n = \sigma_{\text{поля}}$, а нормаль к площадке \vec{n} с учетом правила правовинтового обхода контура C указывает направление вектора \vec{D}* . Определение \vec{D} как потокового вектора показывает его принципиальное отличие от линейного (циркуляционного) вектора напряженности \vec{E} , являющегося силовой характеристикой электрического поля. Физически, поле потокового вектора $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$ электрического смещения (индукции) есть отклик среды на воздействие силового вектора \vec{E} электрической напряженности.

Продолжая анализ соотношений (8), видим, что, согласно этим соотношениям связи векторных полей \vec{D} и \vec{A}^e , *электрическому заряду q отвечает его полевой эквивалент - поле электрического векторного потенциала \vec{A}^e , размерность которого - линейная плотность электрического заряда*. В итоге, с целью реализации конечного результата наших рассуждений введем понятие первой фундаментальной корпускулярно-полевой пары $q \Leftrightarrow \vec{A}^e$ с единицами измерения в системе физических единиц СИ *Кулон \Leftrightarrow Кулон/метр*.

Эти корпускулярно-полевые представления аргументированно подтверждаются также и непосредственным следствием в виде соотношения (6) связи электрического векторного потенциала \vec{A}^e и магнитной напряженности \vec{H} с единицей измерения *Ампер/метр*, представляющего собой полевой эквивалент

полного электрического тока: токов проводимости и смещения $J = J_{np} + J_{см}$, величина (сила тока) которого имеет единицу измерения *Ампер*.

Перейдем теперь к магнитному векторному потенциалу \vec{A}^m . Поскольку вектор электрической напряженности \vec{E} измеряется в СИ *Вольт/метр*, либо формально математически (но не физически) тождественно *Ньютон/Кулон*, то, согласно соотношению (5) связи магнитного векторного потенциала \vec{A}^m с вектором \vec{E} , единица измерения вектора \vec{A}^m будет *(Ньютон·сек)/Кулон*, то есть имеет размерность *импульс на единицу заряда*. Данная размерность магнитной компоненты векторного потенциала \vec{A}^m в настоящее время считается общепринятой и вполне очевидной, поскольку совместно со скалярным электрическим потенциалом φ^e весьма заманчиво представить полевой аналог четырехвектора «энергии-импульса», так в виде называемого 4^x – потенциала.

Следовательно, соотношение (5) можно, казалось бы, назвать полевым аналогом уравнения динамики поступательного движения в механике (II закон Ньютона). Действительно, указанную размерность магнитного векторного потенциала, другими словами, его физический смысл находят (например, в работе [10]) при анализе действия вихревого поля вектора \vec{A}^m на точечный электрический заряд посредством именно II закона Ньютона, обычного механического. Однако, по нашему мнению, обобщать выводы, полученные в рамках уравнения динамики поступательного движения для точечного заряда на случай макрообъекта (совокупности точечных зарядов), находящегося в вихревых полях: $\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t = -\text{rot } (\partial \vec{A}^m / \partial t)$ с физической точки зрения, мягко говоря, весьма сомнительно.

Для прояснения сложившейся ситуации рассмотрим далее соотношение (6а), которое представим в интегральной форме:

$$\oint_C \vec{A}^m d\vec{l} = \int_{S_C} \vec{B} d\vec{S} = \Phi^m. \quad (9)$$

Видно, что величина циркуляции вектора \vec{A}^m по контуру C определяется магнитным потоком Φ^m через поверхность S_C и имеет единицу измерения в системе СИ *Вебер* = *(Джоуль·секунда)/Кулон*, что соответствует модулю *момента импульса на единицу электрического заряда*. При этом, согласно (9), размерность магнитного векторного потенциала \vec{A}^m может быть двоякой: либо указанная выше общепринятая *импульс на единицу заряда*, либо ей альтернативная *линейная плотность момента импульса на единицу заряда*. Конечно, с формальной точки зрения обе размерности вектора \vec{A}^m , выраженные через

единицы измерения, математически тождественны, но физически это принципиально различные величины.

Целесообразно отметить, что сам Максвелл призывал ответственно относиться к математическим операциям над векторами электромагнитного поля и физической трактовке таковых. Вот его слова: *“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.”* ([9] п. 12). И далее конкретно: *“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.”* ([9] п. 14).

Не преувеличивая, трактат Максвелла [9] можно назвать «Библией электромагнетизма» и физическими основами математического анализа, однако даже в учебной литературе повсеместно встречаются физически бессмысленные математические выражения $\text{div } \vec{E}$ и $\text{rot } \vec{B}$. Такое формальное использование математики создает путаницу понятий и попросту мешает действительно разобраться в физическом содержании соотношений электродинамики. Это усугубляется и абсолютной системой единиц СГС, когда безразмерные коэффициенты $\epsilon_0 = 1$ и $\mu_0 = 1$ делают векторы \vec{E} и \vec{D} , \vec{H} и \vec{B} физически тождественными, где Эрстед и Гаусс равны в пустоте, а в средах различаются только численно.

Итак, согласно Максвеллу, в электродинамике линейные (циркуляционные) векторы \vec{E} и \vec{H} имеют размерность *линейной плотности физической величины*, а потокосые векторы \vec{D} , \vec{B} и \vec{j} – *ее поверхностной плотности*. В частности, размерность вектора магнитной индукции \vec{B} равна *поверхностной плотности момента импульса на единицу заряда*, в системе СИ - *Тесла*. Экспериментально это наглядно иллюстрируется эффектом Эйнштейна-де Гааза, где в материальной среде при ее однородном намагничивании возникает механический момент вращения, направленный коллинеарно полю, обусловленный упорядочением собственных магнитных моментов, соответственно, моментов импульса электронов в атомах вещества среды. Следовательно, *поле вектора \vec{B} – это поле момента импульса среды, порождающее ее вращение*. Поэтому в соотношении (4а) размерностью вихревого поля магнитного векторного потенциала \vec{A}^m является *линейная плотность момента импульса на единицу заряда*.

В итоге, согласно формулам (9), локальной характеристике микрочастицы - *моменту импульса на единицу заряда* сопоставляется его полевой эквивалент - магнитный векторный потенциал \vec{A}^m с размерностью *линейной плотности момента импульса на единицу заряда*. что дает вторую фундаментальную корпускулярно-полевою пару: для электрона - $\hbar/2e \Leftrightarrow \vec{A}^m$ с единицами измерения (Джоуль·секунда)/Кулон \Leftrightarrow (Джоуль·секунда)/(Кулон·метр).

Вернемся к соотношению (5) связи вектора \vec{A}^m с вектором \vec{E} . Как теперь показано, размерность вихревого поля вектора электрической напряженности \vec{E} однозначно равна *линейной плотности момента силы на единицу заряда* с единицей измерения в СИ (Ньютон·метр)/(Кулон·метр), что естественно не опровергает традиционную единицу измерения этой величины Вольт/метр, а лишь уточняет ее физический смысл. Таким образом, в действительности *соотношение (5) является полевым аналогом основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела*, что логически соответствует рассмотренным выше корпускулярно-полевым представлениям.

Подводя предварительный итог, приходим к заключению, что установленная здесь принципиальная двойственность физических параметров электрического заряда говорит о реальном существовании фундаментального «корпускулярно-полевого дуализма» природы электричества, кстати, схожего по названию с «корпускулярно-волновым дуализмом» в квантовой механике. Формально и здесь и там имеем неразрывную взаимосвязь материи с ее пространственно-временным собственным полем. Однако их сущностные различия принципиальны: *корпускулярно-полевой дуализм* реализуется на микро- и макроуровнях строения Материи и основан на объективном единстве частицы материи и ее собственного первичного векторного поля в реальном пространстве физического вакуума, что в свою очередь неразрывно связано с реально наблюдаемым обычным традиционным электромагнитным полем, а в концепции *корпускулярно-волнового дуализма* микрочастица представляется скалярной волной вероятности в абсолютно пустом, абстрактном пространстве.

Говоря более конкретно, фундаментальность *корпускулярно-полевого дуализма Материи* обусловлена тем, что как две стороны одной медали локальные характеристики микрочастицы (совокупно, и макрообъекта) находятся в неразрывной связи с ее собственными полевыми параметрами. Электрическому заряду q , кратному кванту электрического потока - заряду электрона $|e^-|$, соответствует электрический векторный потенциал \vec{A}^e , а удельному (на единицу заряда) моменту, кратному кванту магнитного потока $\hbar/2e$, отвечает

магнитный векторный потенциал \vec{A}^m , при этом ориентации векторов полей \vec{A}^e и \vec{A}^m взаимно ортогональны.

Итак, мы видим, что векторные потенциалы – это полноправные физически значимые поля, и учет этого обстоятельства позволяет углубить и кардинально модернизировать концептуальные основы классической электродинамики, где, в частности, необходимо ожидать, что обсуждаемая здесь система уравнений Максвелла будет лишь рядовым частным следствием.

Покажем конкретно, какую же роль играют векторные потенциалы в электромагнитных процессах и явлениях? Очевидно, здесь четко прослеживается реальная возможность обратить проведенные выше рассуждения вспять, поскольку из обсуждаемой концепции «корпускулярно-полевого дуализма» физических характеристик микрочастицы необходимо следуют электродинамические уравнения современной теории электромагнитного поля на базе *системы соотношений первичной взаимосвязи ЭМ поля* с компонентами электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} напряженности и ЭМ векторного потенциала с электрической \vec{A}^e и магнитной \vec{A}^m компонентами:

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad \text{rot } \vec{A}^m &= \mu\mu_0 \vec{H} \quad , & \text{(б)} \quad \text{rot } \vec{A}^e &= \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E} \quad , \\ \text{(в)} \quad \text{div } (\varepsilon\varepsilon_0 \vec{A}^m) &= 0 \quad , & \text{(г)} \quad \text{div } (\mu\mu_0 \vec{A}^e) &= 0 \quad , & (10) \\ \text{(д)} \quad \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t} \quad , & \text{(е)} \quad \vec{H} &= \frac{\vec{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t} \quad . \end{aligned}$$

Объединение соотношений (4) – (7) в систему взаимосвязанных уравнений (10) представляется весьма конструктивным, поскольку в этом случае возникает система дифференциальных уравнений, описывающих значительно более сложное и необычное с точки зрения общепринятых воззрений вихревое векторное поле, состоящее из совокупности функционально связанных между собой четырех полевых компонент. Конкретно оно состоит из реально наблюдаемых в эксперименте полей векторов электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} напряженностей - *поля электромагнитного силового взаимодействия частиц Материи* и ненаблюдаемых напрямую полей электрического \vec{A}^e и магнитного \vec{A}^m векторных потенциалов - *собственного электромагнитного поля частиц Материи, полевого эквивалента их локальных характеристик: заряда и спина, которые также напрямую ненаблюдаемы*, а лишь опосредовано изучением их полей взаимодействия. Такое четырехкомпонентное векторное поле физически логично назвать реальным электромагнитным полем.

Объективность существования указанного *четырёхкомпонентного вихревого поля* иллюстрируется нетривиальными следствиями из полученных выше соотношений, поскольку подстановки (10д) в (10в) и (10е) в (10а) приводят к системе новых электродинамических уравнений, структурно аналогичной системе традиционных уравнений Максвелла (1), но уже для *поля ЭМ векторного потенциала* с электрической \vec{A}^e и магнитной \vec{A}^m компонентами:

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad \text{rot } \vec{A}^e &= -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t}, & \text{(б)} \quad \text{div}(\mu\mu_0 \vec{A}^e) &= 0, \\ \text{(в)} \quad \text{rot } \vec{A}^m &= \mu\mu_0 \left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t} \right), & \text{(г)} \quad \text{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \vec{A}^m) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Чисто вихревой характер компонент поля векторного потенциала обеспечивается условием калибровки - дивергентными уравнениями (11б) и (11г).

Соответственно, аналогичные математические операции с соотношениями (10) позволяют получить еще две других системы уравнений [8]:

для *электрического поля* с компонентами \vec{E} и \vec{A}^e

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad \text{rot } \vec{E} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t} \right), & \text{(б)} \quad \text{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}) &= 0, \\ \text{(в)} \quad \text{rot } \vec{A}^e &= \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}, & \text{(г)} \quad \text{div}(\mu\mu_0 \vec{A}^e) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

и для *магнитного поля* с компонентами \vec{H} и \vec{A}^m :

$$\begin{aligned} \text{(а)} \quad \text{rot } \vec{H} &= -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\vec{A}^m}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t} \right), & \text{(б)} \quad \text{div}(\mu\mu_0 \vec{H}) &= 0, \\ \text{(в)} \quad \text{rot } \vec{A}^m &= \mu\mu_0 \vec{H}, & \text{(г)} \quad \text{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \vec{A}^m) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, уравнения системы (10) первичной взаимосвязи компонент ЭМ поля и поля ЭМ векторного потенциала, безусловно, фундаментальны. Кстати, если считать соотношения (10) исходными, то из них подобным образом [8] следуют и уравнения системы (1), справедливые для локально электронейтральных сред ($\rho = 0$). Существенно здесь и также то, что в системах (1), (11) - (13) их дивергентные уравнения представляют собой начальные условия в математической задаче Коши для соответствующих роторных уравнений, что делает эти системы уравнений замкнутыми.

Далее, как и должно быть, из всех этих систем электродинамических уравнений непосредственно следуют волновые уравнения для соответствующим

щих полевых компонент (полностью аналогично выводу уравнения (2)) и соотношения баланса (аналогично выводу формулы (3)):
для *потока момента ЭМ импульса* из уравнений (11)

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

для *потока электрической энергии* из уравнений (12)

$$\operatorname{div} [\vec{E}, \vec{A}^e] = -\varepsilon\varepsilon_0 (\vec{E}, \vec{E}) - \mu\mu_0 \vec{A}^e \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t} \right) \quad (15)$$

и для *потока магнитной энергии* из уравнений (13)

$$\operatorname{div} [\vec{H}, \vec{A}^m] = -\mu\mu_0 (\vec{H}, \vec{H}) - \varepsilon\varepsilon_0 \vec{A}^m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\vec{A}^m}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t} \right). \quad (16)$$

Эти соотношения еще раз подтверждают и аргументированно доказывают, что, наряду с ЭМ полем с парой векторных компонент \vec{E} и \vec{H} , в Природе существуют и другие поля: поле ЭМ векторного потенциала с компонентами \vec{A}^e и \vec{A}^m , электрическое поле с компонентами \vec{E} и \vec{A}^e , магнитное поле с \vec{H} и \vec{A}^m . Именно структура конкретного электродинамического поля из двух векторных взаимно ортогональных полевых компонент реализует способ его объективного существования, делает принципиально возможным его перемещение в пространстве в виде потока соответствующей физической величины. В реальности все эти потоки распространяются посредством лишь только одной как бы «обычной» плоской волны с взаимно ортогональными полевыми компонентами попарно коллинеарных векторов (\vec{E}, \vec{A}^m) и (\vec{H}, \vec{A}^e) , совокупно переносящих в пространстве (см. соотношения баланса) электрическую (15) и магнитную (16) энергии, электромагнитные импульс (3) и его момент (14).

Итак, в окончательном итоге, полученная в наших рассуждениях система взаимосвязанных векторных уравнений (10) позволила нам углубленно, физически преемственно и последовательно сформулировать по-новому концептуальные основы современной теории электромагнитного поля, состоящего из функционально связанных между собой четырех полевых компонент. Реально наблюдаемых в эксперименте полей векторов электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} напряженностей - поля электромагнитного силового взаимодействия частиц Материи и напрямую ненаблюдаемых полей электрического \vec{A}^e и маг-

нитного \vec{A}^m векторных потенциалов - собственного электромагнитного поля частиц Материи, полевого эквивалента их локальных характеристик.

Такое четырехкомпонентное векторное поле следует называть **реальным электромагнитным полем** (или просто, **электромагнитным полем**), совокупно переносящего посредством традиционной электромагнитной волны электрическую и магнитную энергии, электромагнитные импульс и его момент, главной особенностью которого является фундаментальная неразрывная связь электромагнитных классических \vec{E} и \vec{H} полей взаимодействия с их векторными \vec{A}^e и \vec{A}^m потенциалами являющихся собственными первичными полями частиц микромира, обусловленными фундаментальным законом Природы - «корпускулярно-полевым дуализмом физических характеристик Материи».

Литература

1. Матвеев А.Н. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980.
2. Физический энциклопедический словарь. М.: СЭ, 1983.
3. Lebedew P.N. // Annalen der Physik. 1901. fasc. 4. Bd 6. S. 433-458.
4. Beth R.A. // Phys. Rev. 1935. V. 48. p. 471; 1936. V. 50. p. 115.
5. Вульфсон К.С. // УФН. 1987. Том 152. Вып. 4. С. 667-674.
6. Храпко Р.И. // Вестник РУДН. Сер. «Физика». 2002. № 10(1). С. 40-48.
7. Сидоренков В.В. // Труды VI Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. Часть III. С. 215-219; // <http://scipeople.ru/users/8652252/> .
8. Сидоренков В.В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2006. № 1. С. 28-37; // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 11. С. 75-82; // Материалы X Международной конференции «Физика в системе современного образования». Санкт-Петербург: РГПУ, 2009. Том 1. Секция 1. “Профессиональное физическое образование”. С. 114-117; // Необратимые процессы в природе и технике: Сборник научных трудов. Вып. 3. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 56-83.
9. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. В 2-х томах. М.: Наука, 1989.
10. Антонов Л.И., Миронова Г.А., Лукашёва Е.В., Чистякова Н.И. Векторный магнитный потенциал в курсе общей физики / Препринт № 11. М.: Изд-во Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 1998.