УДК 537.8

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Сидоренков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, vsidor4606@yandex.ru

Рассматриваются базовые физические представления современной теории электромагнитного поля, основанные на концепции «корпускулярно-полевого дуализма» характеристик микрочастицы, где ее электрическому заряду соответствует полевой эквивалент в виде электрического векторного потенциала, а ее удельному (*на единицу заряда*) *собственному моменту отвечает поле магнитного векторного потенциала.*

Полевая концепция природы электричества является фундаментальной базой 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 основная аксиома классической электродинамики - неразрывное единство переменных во времени электрического и магнитного полей. В современной форме такая система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\text{(а)}\ \operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \qquad \text{(б)}\ \operatorname{div}\vec{D} = \rho\ , \qquad (1)$$

$$\text{(в)}\ \operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}, \qquad \text{(г)}\ \operatorname{div}\vec{B} = 0\ .$$

Здесь соответственно поля: векторов электрической $\vec{E}$ и магнитной $\vec{H}$ напряженности, электрической $\vec{D}=\varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$ и магнитной $\vec{B}=\mu\mu_0\vec{H}$ индукции, плотности электрического тока $\vec{j}=\sigma\vec{E}$; абсолютные $\varepsilon\varepsilon_0$ 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 $\vec{E}$:

$$\mathrm{rotrot}\,\vec{E} = \mathrm{graddiv}\,\vec{E} - \Delta\vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}\mathrm{rot}\,\vec{H} = -\sigma\mu\mu_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} - \frac{1}{\mathrm{v}^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}. \qquad (2)$$

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 $\mathrm{v} = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$, а колебания, согласно структуре уравнений (1), $\vec{E}$ и $\vec{H}$ компонент волн 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:

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

Видно, что поступающий извне в данную точку среды поток электромагнитной энергии, 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 энергии.

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 возникает механический момент вращения, направленный коллинеарно подмагничивающему полю магнитной индукции $\vec{B}$. Так же далеко не ясен вопрос о 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 стороны, физически понятно, что электромагнитное излучение – это излучение возбужденными атомами избытка энергии в виде фотонов, которые забирают от атома не только часть энергии, но и уносят долю внутреннего углового момента атома. Следовательно, распространяющееся в виде волн электромагнитное поле должно обладать вполне определенной величиной момента импульса, что, кстати, наблюдалось в экспериментах [3, 4].

Таким образом, <u>принципиальный дефект традиционной классической электродинамики в том, что в ее представлениях об электрическом заряде и его поле отсутствует понятие о спине (собственном моменте импульса)</u>. 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* [5], но и они оказались неконструктивными.

Покажем, что, несмотря на серьезную методическую модернизацию исходных максвелловских уравнений Герцем, Хевисайдом и Эйнштеном и грандиозные успехи внедрения достижений электромагнетизма во многих областях жизни современного человеческого общества, <u>общепринятая на сегодня теория электромагнитного поля и поныне базируется только лишь на представлениях 19 века о физических свойствах электрического заряда материальных тел</u>. Для аргументированной иллюстрации данного факта здесь нам вполне достаточно двух первичных фундаментальных соотношений электромагнетизма - *закона Кулона силы взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов*

$$\vec{F}_{Кул} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^3}\vec{r} \qquad (4)$$

и *закона сохранения электрического заряда* [1]

$$\operatorname{div}\vec{j} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0\,, \qquad (5)$$

чтобы цепочкой последовательных физико-математических рассуждений построить традиционную систему (1) уравнений электродинамики Максвелла.

Фундаментальность закона Кулона (4) состоит в том, что его посредством описывается силовое взаимодействие разнесенных в пространстве неподвижных электрически заряженных материальных тел, где для изучения следствий такого взаимодействия вводят понятие электрического поля в виде *напря-*

женности – силы Кулона на единицу заряда: $\vec{E}(\vec{r}) = \vec{F}_{Кул}/q_0$, где q_0 - пробный точечный заряд. Топология структуры электрического поля точечного заряда $E(r) \sim 1/r^2$ такова, что интеграл от этой функции по сфере любого радиуса константен: $(1/r^2)\cdot 4\pi\ r^2 = 4\pi$, а при использовании понятия телесного угла несложно убедиться: *поток вектора поля электрической индукции* (*смещения*) $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$ *через произвольную замкнутую поверхность S тождественно равен суммарному стороннему электрическому заряду* $q_{\,стор}$ *в объеме* V_S *внутри этой поверхности, причем на самой указанной поверхности индуцируется поляризационный электрический заряд* $q_{поляр}$*, такой, что*:

$$\varPhi^e = \oint_S \vec{D}d\vec{S} = \oint_S \sigma_{поляр}dS = q_{\,поляр} = \int_{V_S} \rho dV = q_{\,стор}.$$

Эти рассуждения описывают результат электрической поляризации, а *электростатической теоремой Гаусса* их называют по той причине, что она тождественно устанавливает: $\varPhi^e = q_{\,поляр} = q_{\,стор}$. Правда, обычно в физические подробности процесса поляризации не вникают, а потому о поляризационном заряде $q_{\,поляр}$ просто не говорят. Здесь первые два интеграла это *определение вектора* $\vec{D}$ *- численно равного поверхностной плотности поляризационного заряда* $\sigma_{\,поляр}$ *на пробной площадке, ориентация которой такова, что* $\sigma_{\,поляр}$ *на ней максимальна, при этом нормаль* $\vec{n}$ *к поверхности площадки коллинеарна вектору* $\vec{D}$. В системе электродинамических дифференциальных уравнений (1) теорема Гаусса представлена (см. теорему Гаусса-Остроградского) соотношением (1б), описывающим результат электрической поляризации материальной среды, где в случае ее электронейтральности ($\rho = 0$) оно имеет вид $\operatorname{div}\vec{D} = 0$.

Воспользуемся теперь другим первичным фундаментальным законом электромагнетизма - *законом сохранения электрического заряда* (5), структурно представляющим собой уравнение непрерывности. Закон гласит: *изменение во времени заряда* $\partial\rho/\partial t$ *в данной точке пространства единственно возможно лишь за счет транспорта зарядов извне* $\operatorname{div}\vec{j}$, ведь по определению (теорема Гаусса-Остроградского) <u>дивергенция</u> - это объемная плотность потока векторного поля в данной точке. Тогда подстановка в (5) уравнения (1б) дает формулу $\operatorname{div}(\vec{j} + \partial\vec{D}/\partial t) = 0$. И с учетом того, что для любого векторного поля $\operatorname{div}\operatorname{rot}\vec{a} = 0$, получаем еще одно уравнение обсуждаемой системы:

$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \partial\vec{D}/\partial t$ (1в). Это уравнение называют законом полного тока: *электрические токи проводимости и смещения порождают вихревое магнитное поле, силовые линии векторов напряженности* $\vec{H}(\vec{r})$ *которого охватывают линии этих токов.*

Итак, в области существования движущихся зарядов и переменных во времени электрических полей $\operatorname{rot}\vec{H} \neq 0$, то есть в уравнении (1в) функция $\vec{H}(\vec{r})$ является вихревой, а потому для математического уточнения данной топологии магнитного поля введем соотношение $\operatorname{div}(\mu\mu_0\vec{H}) = 0$. Тем самым получим следующее уравнение системы (1) – уравнение (1г). Поскольку дивергенция - объемная плотность потока векторного поля в данной точке, то уравнение $\operatorname{div}\vec{B} = 0$ способно описать не только вихревые свойства функции $\vec{H}(\vec{r})$, но и ее потенциальную версию, случай когда $\operatorname{rot}\vec{H} = 0$. В этой ситуации соотношение (1г) математически представляет физический результат магнитной поляризации материальной среды.

Наконец, частным дифференцированием по времени $\partial/\partial t$ уравнения (1г) получаем на основе $\operatorname{div}\operatorname{rot}\vec{a} = 0$ адекватное с учетом знака *закону электромагнитной индукции Фарадея* уравнение (1а), последнее в системе (1). Итак, *изменяющееся во времени поле магнитной индукции порождает в данной точке пространства вихревое электрическое поле*. Ввиду того, что в уравнении (1а) $\operatorname{rot}\vec{E} \neq 0$, то функция поля $\vec{E}(\vec{r})$ является вихревой, и эту топологию способно уточнить, согласно вышесказанному о дивергенции, уже полученное нами ранее уравнение (1б) в виде $\operatorname{div}\vec{D} = 0$. Как видим, <u>дивергентные уравнения</u> (1б) и (1г) <u>как математически, так и физически весьма содержательны</u>. Итак, теперь, казалось бы, вопрос исчерпан.

Но это только то, что лежит на поверхности. Если взглянуть глубже, то те же дивергентные уравнения 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 [6], и по сей день концептуально не понят, а потому в теории электромагнетизма эти не наблюдаемые напрямую поля остаются в должной мере не принятыми и, в сущности, не используемыми. Попытаемся 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: $\operatorname{div}\operatorname{rot}\vec{a}=0$. Поэтому магнитную компоненту векторного потенциала $\vec{A}^m$ можно ввести посредством соотношения $\operatorname{div}\vec{B}=0$ системы уравнений (1), описывающим магнитную поляризацию (намагниченность) материальной среды, а электрическую компоненту $\vec{A}^e$ - соотношением $\operatorname{div}\vec{D}=0$, описывающим поляризацию локально электронейтральной ($\rho = 0$) среды:

$$\text{(а)}\ \operatorname{rot}\vec{A}^m = \mu\mu_0\vec{H}\,, \qquad \text{(б)}\ \operatorname{rot}\vec{A}^e = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}\,. \tag{6}$$

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 (6а) в уравнение вихря электрической напряженности (1а) приводит к известной формуле связи поля вектора указанной напряженности с магнитным векторным потенциалом [1]:

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\,, \tag{7}$$

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

При аналогичной подстановке соотношения для электрического векторного потенциала (6б) 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:

$$\vec{H} = \frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\,. \tag{8}$$

Здесь $\tau_{рел}=\varepsilon\varepsilon_0/\sigma$ - 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:

$$\text{(а)}\ \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m)=0\,, \qquad \text{(б)}\ \operatorname{div}(\mu\mu_0\vec{A}^e)=0\,, \tag{9}$$

где абсолютные электрическая $\varepsilon\varepsilon_0$ и магнитная $\mu\mu_0$ проницаемости, согласно соотношениям (7) и (8), соответствуют в формулах (9) конкретным компонентам векторного потенциала.

Как видим, векторные потенциалы принципиально сопровождают явления электрической и магнитной поляризаций материальной среды, причем, согласно (6), пары векторов $\vec{H}$ *и* $\vec{A}^m$, $\vec{E}$ *и* $\vec{A}^e$ *- взаимно ортогональны*; соответственно, согласно (7) и (8), *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 (7) и (8)) 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 векторных потенциалов $\vec{A}^e$ и $\vec{A}^m$, обсуждаемую для магнитного векторного потенциала еще Максвеллом при анализе своих электродинамических построений ([7] п. 590). Согласно точке зрения Максвелла, вектор $\vec{A}^m$ “*может быть признан фундаментальной величиной в теории электромагнетизма*” [8].

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

Итак, вначале рассмотрим электрический векторный потенциал $\vec{A}^e$. Для этого соотношение (6б) связи электрических векторов индукции и векторного потенциала для большей наглядности и математической общности представим в интегральной форме:

$$\oint_C \vec{A}^e d\vec{l} = \int_{S_C} \vec{D} d\vec{S} = \int_{S_C} \sigma_{поляр} dS = q_{поляр} \quad . \tag{10}$$

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 $q_{поляр}$, индуцированным на этой поверхности. Отсюда снова следует *определение поля вектора электрического смещения* $\vec{D}$, *численно равного плотности заряда* $\sigma_{поляр}$ *на пробной* площадке, *ориентация которой в данной точке создает на ней максимальное значение этого заряда:* $D_n = \sigma_{поляр}$, *а нормаль к площадке* $\vec{n}$ *с учетом правила правовинтового обхода контура С 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 $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$ электрического смещения (индукции) есть отклик среды на воздействие силового вектора $\vec{E}$ электрической напряженности.

Продолжая анализ соотношений (10), 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 <u>*первой фундаментальной корпускулярно-полевой пары*</u> $q \Leftrightarrow \vec{A}^e$ с единицами измерения в системе физических единий СИ *Кулон* $\Leftrightarrow$ *Кулон/метр*.

Эти корпускулярно-полевые представления аргументированно подтверждаются также и непосредственным следствием в виде соотношения (8) 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 $J = J_{пр} + J_{см}$, 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 (7) 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 реализовать полевой аналог четырехвектора «*энергии-импульса*», так называемый 4^x – потенциал.

Следовательно, соотношение (7) 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 [8]) 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: $\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\,\partial\vec{B}/\partial t = -\,\mathrm{rot}\,(\partial\vec{A}^m/\partial t\,)$ с физической точки зрения, мягко говоря, весьма сомнительно.

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

$$\oint_C \vec{A}^m d\vec{l} \;=\; \int_{S_C} \vec{B} d\vec{S} = \Phi^m\ . \tag{11}$$

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 (11), 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*." ([7] 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 элементов*." ([7] п. 14).

Не преувеличивая, трактат Максвелла можно назвать Библией электромагнетизма и физическими основами математического анализа, однако даже в учебной литературе повсеместно встречаются физически бессмысленные математические выражения "$\mathrm{div}\vec{E}$" и "$\mathrm{rot}\vec{B}$". 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 $\varepsilon_0 = 1$ и $\mu_0 = 1$ делают векторы $\vec{E}$ и $\vec{D}$, $\vec{H}$ и $\vec{B}$ сущностно тождественными, где *Эрстед* и *Гаусс* равны в пустоте, а в средах различаются только численно.

Итак, согласно Максвеллу, в электродинамике <u>линейные (циркуляционные) векторы</u> $\vec{E}$ и $\vec{H}$ имеют размерность *линейной плотности физической величины*, а <u>потоковые векторы</u> $\vec{D}$, $\vec{B}$ 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 (6а) размерностью вихревого поля магнитного векторного потенциала $\vec{A}^m$ является *линейная плотность момента импульса на единицу заряда*.

В итоге, согласно формулам (11), 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 <u>вторую фундаментальную корпускулярно-полевую пару</u>: для электрона - $h/2e \Leftrightarrow \vec{A}^m$ с единицами измерения (*Джоуль·секунда*)/*Кулон* ⇔ (*Джоуль·секунда*)/(*Кулон·метр*).

Вернемся к соотношению (7) 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 нисколько не опровергает традиционную единицу измерения этой величины *Вольт/метр*, а лишь уточняет ее физический смысл. Таким образом, в действительности *соотношение* (7) *является полевым аналогом основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела*, что логически однозначно 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 $h/2e$, отвечает магнитный векторный потенциал $\vec{A}^m$, при этом ориентации векторов полей $\vec{A}^e$ и $\vec{A}^m$ взаимно ортогональны.

Удивительно здесь то, что указанные *электромагнитные векторные потенциалы - собственные поля частиц Материи*, являющиеся полевыми эквивалентами их *корпускулярных* (*локальных*) *характеристик* непосредственно следуют из уравнений классической электродинамики (1), первоначальная версия которых появилась еще во второй половине 19 века обобщением Дж.К. Максвеллом [7] эмпирических фактов того времени.

Итак, мы видим, что векторные потенциалы – это полноправные физически значимые поля, и учет этого обстоятельства должно нам позволить 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:

$$
\begin{aligned}
&(\text{а})\ \ \operatorname{rot}\vec{A}^m = \mu\mu_0\vec{H}\,, && (\text{б})\ \ \operatorname{rot}\vec{A}^e = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}\,, \\
&(\text{в})\ \ \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m) = 0\,, && (\text{г})\ \ \operatorname{div}(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0\,, \qquad\qquad (12)\\
&(\text{д})\ \ \vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\,, && (\text{е})\ \ \vec{H} = \frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\,.
\end{aligned}
$$

Объединение соотношений (6) – (9) в систему взаимосвязанных уравнений (12) 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 *четырехкомпонентного вихревого поля* иллюстрируется нетривиальными следствиями из полученных выше соотношений, поскольку подстановки (12д) в (12в) и (12е) в (12а) 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*:*

$$\text{(а)}\ \ \mathrm{rot}\,\vec{A}^e = -\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}, \qquad \text{(б)}\ \ \mathrm{div}\,(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0, \qquad (13)$$

$$\text{(в)}\ \ \mathrm{rot}\,\vec{A}^m = \mu\mu_0\left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\right), \qquad \text{(г)}\ \ \mathrm{div}\,(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m) = 0.$$

Чисто вихревой характер компонент поля векторного потенциала обеспечивается условием калибровки - дивергентными уравнениями (13б) и (13г).

Соответственно, аналогичные математические операции с соотношениями (12) позволяют получить еще две других системы уравнений [6]: для *электрического поля* с компонентами $\vec{E}$ и $\vec{A}^e$

$$\text{(а)}\ \ \mathrm{rot}\,\vec{E} = -\mu\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\right), \qquad \text{(б)}\ \ \mathrm{div}(\varepsilon\varepsilon_0\vec{E}) = 0, \qquad (14)$$

$$\text{(в)}\ \ \mathrm{rot}\,\vec{A}^e = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}, \qquad \text{(г)}\ \ \mathrm{div}\,(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0.$$

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

$$\text{(а)}\ \ \mathrm{rot}\,\vec{H} = -\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^m}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\right), \qquad \text{(б)}\ \ \mathrm{div}\,(\mu\mu_0\vec{H}) = 0, \qquad (15)$$

(в) $\operatorname{rot}\vec{A}^m = \mu\mu_0\vec{H}$, (г) $\operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m) = 0$.

Таким образом, уравнения системы (12) первичной взаимосвязи компонент ЭМ поля и поля ЭМ векторного потенциала, безусловно, фундаментальны. Кстати, если считать соотношения (12) исходными, то из них подобным образом [6] следуют и уравнения системы (1), справедливые для локально электронейтральных сред ($\rho = 0$). Существенно здесь и также то, что в представленных системах (1), (13) - (15) 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 соответствующих полевых компонент (полностью аналогично выводу уравнения (2)) и соотношения баланса (аналогично выводу формулы (3)):
для *потока момента ЭМ импульса* из уравнений (13)

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

для *потока электрической энергии* из уравнений (14)

$$\operatorname{div}[\vec{E}, \vec{A}^e] = -\varepsilon\varepsilon_0(\vec{E}, \vec{E}) - \mu\mu_0\vec{A}^e\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\right) \tag{17}$$

и для *потока магнитной энергии* из уравнений (15)

$$\operatorname{div}[\vec{H}, \vec{A}^m] = -\mu\mu_0(\vec{H}, \vec{H}) - \varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^m}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\right). \tag{18}$$

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 компо-*

нентами попарно коллинеарных векторов ($\vec{E}$, $\vec{A}^m$) и ($\vec{H}$, $\vec{A}^e$), *совокупно переносящих в пространстве* [6] (*см. соотношения баланса*) *электрическую* (17) *и магнитную* (18) *энергии, электромагнитные импульс* (3) *и его момент* (16).

Итак, в окончательном итоге, полученная в наших рассуждениях система взаимосвязанных векторных уравнений (12) 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: <u>реально наблюдаемых в эксперименте полей векторов электрической $\vec{E}$ и магнитной $\vec{H}$ напряженностей</u> - *поля электромагнитного силового взаимодействия частиц Материи* и <u>напрямую ненаблюдаемых полей электрического $\vec{A}^e$ и магнитного $\vec{A}^m$ векторных потенциалов</u> - *собственного электромагнитного поля частиц Материи, полевого эквивалента их локальных характеристик.* Такое четырехкомпонентное векторное поле можно называть **реальным электромагнитным полем** (подробности в работах (6)), главной особенностью которого является фундаментальная связь электромагнитных классических полей с их векторными потенциалами - базовыми представлениями микромира.

Литература

1. *Матвеев А.Н.* Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980.
2. Физический энциклопедический словарь. М.: СЭ, 1983.
3. *Вульфсон К.С.* // УФН. 1987. Том 152. Вып. 4. С. 667-674.
4. *Соколов И.В.* // УФН. 1991. Том 161. № 10. С. 175-190.
5. *Храпко Р.И.* // Вестник РУДН. Сер. «Физика». 2002. № 10(1). С. 40-48.
6. *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.
7. *Максвелл Дж. К.* Трактат об электричестве и магнетизме. В 2-х томах. М.: Наука, 1989.
8. *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.