УДК 537.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВЕКТОРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ – ЭТО ПЕРВИЧНОЕ СОБСТВЕННОЕ ПОЛЕ ЧАСТИЦ МИКРОМИРА

В.В. Сидоренков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

В теории электромагнетизма фундаментальный закон Природы «корпускулярно-полевого дуализма Материи» проявляет себя тем, что как две стороны одной медали электромагнитные локальные характеристики микрочастицы и ее первичные собственные полевые параметры неразрывно связаны и обусловлены друг другом: электрическому заряду, кратному кванту электрического потока - заряду электрона, соответствует поле электрического векторного потенциала, а удельному (на единицу заряда) моменту, кратному кванту магнитного потока, отвечает поле магнитного векторного потенциала.

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 <u>уравнений, описывающих поведение электромагнитного поля в неподвижной среде</u>, заложена 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 из (1в) и (1а) получается и уравнение волн поля магнитной напряженности: $\Delta\vec{H} - \sigma\mu\mu_0 \frac{\partial\vec{H}}{\partial t} - \frac{1}{\mathrm{v}^2}\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} = 0$, 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 $\vec{E}$ 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:

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

Кстати, именно по этой причине *роторные уравнения системы* (1) *называют фундаментальными уравнениями*.

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*: $\vec{\mathrm{g}}(\vec{r}\,) = [\vec{D},\vec{B}\,]$. 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 возникает 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 очевидно, 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, <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 заряда)</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* [6], но и они оказались неконструктивными.

К сожалению, 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 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 должной мере непринятыми и, в сущности, неиспользуемыми. 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:

$$\text{(а)}\ \operatorname{rot}\vec{A}^m = \mu\mu_0\vec{H}\,, \qquad \text{(б)}\ \operatorname{rot}\vec{A}^e = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}\,. \tag{4}$$

Таким образом, с точки зрения физического содержания векторные электромагнитные потенциалы непосредственно связаны с электрической и магнитной поляризациями, а потому их следует называть *поляризационными потенциалами*. Правда, сегодня «поляризационным потенциалом» общепринято называть [1] введенный формально по аналогии со скалярным потенциалом вектор Герца $\vec{G} = \dfrac{\vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r}$, посредством которого Герц (да и своими высказываниями) по сути дела ”похоронил” одно из перспективных научных достижений Максвелла - функцию *электротонического состояния* материальной среды [9], описываемого *векторным потенциалом*. Поэтому одна из наших задач показать, что описание явлений электромагнетизма посредством полей векторного потенциала совокупно с традиционными электромагнитными полями информативно богаче и с физической точки зрения логически необходимо для выхода электромагнитной теории из более чем векового концептуального застоя.

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]:

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

описывающей закон электромагнитной индукции Фарадея. Здесь электрический скалярный потенциал: $\vec{E} = -\mathrm{grad}\,\varphi^e$ 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:

$$\vec{H} = \frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t}. \tag{6}$$

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:

$$\text{(а)}\ \ \mathrm{div}\,(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m) = 0\,, \qquad \text{(б)}\ \ \mathrm{div}\,(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0\,, \tag{7}$$

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* *коллиненарны*. 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 реализуется 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 $m_B = e\hbar/2m_e$.

Здесь весьма интересно обратить внимание на тот факт, что *магнетон Бора* описывается линейной комбинацией известных локальных параметров электрона: произведением его заряда $|e^-|$, спина $\hbar/2$ и массы покоя m_e. Следовательно, электрон (да и не только он) – как стабильный объект Материи физически реализуется совокупным посредством не столько прямых (*электрической, магнитной и гравитационной*), сколько перекрестных (*электромагнитных, гравиэлектрических и гравимагнитных*) сил пространственного взаимодействия, благодаря «скрепляющему» действию *Единого Поля поляризации физического вакуума* (см. работу [11]).

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 (4б) связи электрических векторов индукции и векторного потенциала для большей наглядности и математической общности представим в интегральной форме:

$$\oint_C \vec{A}^e d\vec{l} = \int_{S_C} \vec{D} d\vec{S} = \int_{S_C} \sigma_{поляр} dS = q_{поляр} . \tag{8}$$

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 $q_{поляр}$, индуцированным на этой поверхности. Отсюда 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 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 $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$ 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 единий 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 $J = J_{пр} + J_{см}$, 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 (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: $\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\,\partial\vec{B}/\partial t = -\,\mathrm{rot}\,(\partial\vec{A}^m/\partial t)$ с физической точки зрения, мягко говоря, сомнительно.

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

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

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 элементов.*” ([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 “$\mathrm{div}\vec{E}$” 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 $\vec{B}$ 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 потоковые 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-полевую пару: для электрона - $h/2e \Leftrightarrow \vec{A}^m$ 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 нисколько 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 $h/2e$, 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 электромагнитного 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:

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

$$\text{(в)}\ \ \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\vec{A}^m) = 0\,, \qquad \text{(г)}\ \ \operatorname{div}(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0\,, \qquad (10)$$

$$\text{(д)}\ \ \vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\,, \qquad \text{(е)}\ \ \vec{H} = \frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial\vec{A}^e}{\partial t}\,.$$

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 <u>вихревое векторное поле,</u> состоящее из совокупности функционально связанных между собой четырех полевых компонент. Конкретно оно состоит из <u>реально наблюдаемых в эксперименте полей векторов электрической $\vec{E}$ и магнитной $\vec{H}$ напряженностей</u> - *поля электромагнитного силового взаимодействия частиц Материи* и <u>ненаблюдаемых напрямую полей электрического $\vec{A}^e$ и магнитного $\vec{A}^m$ векторных потенциалов</u> - *собственного электромагнитного поля частиц Материи, полевого эквивалента их локальных характеристик*: <u>заряда и спина, которые также напрямую ненаблюдаемы</u>, а лишь опосредовано изучением их полей взаимодействия. Такое четырехкомпонентное векторное поле физически логично назвать <u>реальным электромагнитным полем</u>.

Объективность существования указанного *четырехкомпонентного 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 электромагнитного векторного потенциала* с электрической $\vec{A}^e$ и магнитной $\vec{A}^m$ компонентами*:*

$$\text{(а)}\ \ \operatorname{rot}\vec{A}^e = -\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{A}^m}{\partial t}\,, \qquad \text{(б)}\ \ \operatorname{div}(\mu\mu_0\vec{A}^e) = 0\,, \qquad (11)$$

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

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 $\vec{A}^e$

$$\text{(а)}\ \ \operatorname{rot}\vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^e}{\tau_{рел}} + \frac{\partial \vec{A}^e}{\partial t}\right), \qquad \text{(б)}\ \ \operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}) = 0\,, \tag{12}$$

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

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

$$\text{(а)}\ \ \operatorname{rot}\vec{H} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{A}^m}{\tau_{рел}} + \frac{\partial \vec{A}^m}{\partial t}\right), \qquad \text{(б)}\ \ \operatorname{div}(\mu\mu_0 \vec{H}) = 0\,, \tag{13}$$

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

Таким образом, уравнения системы (10) первичной взаимосвязи компонент *электромагнитного* поля и поля *электромагнитного* 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 соответствующих полевых компонент (полностью аналогично выводу уравнения (2)) и соотношения баланса (аналогично выводу формулы (3)):
для *потока момента электромагнитного импульса* из уравнений (11)

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

для *потока электрической энергии* из уравнений (12)

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

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

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

Эти соотношения еще раз подтверждают и аргументированно доказывают, что, наряду с *электромагнитным полем с парой векторных компонент* $\vec{E}$ *и* $\vec{H}$, в Природе существуют и другие поля: *поле электромагнитного 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» электромагнитной 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), что в общем случае свойственно любому материальному объекту, в том числе, и электромагнитному полю как разновидности Материи.

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 магнитного $\vec{A}^m$ 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/publication/100582/.
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.
11. *Сидоренков В.В.* // http://scipeople.ru/publication/100855/.