

МОНОПОЛЬ ДИРАКА – ФАНТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

В. В. Сидоренков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Главной целью проведенного исследования было понять, почему до настоящего времени не удается экспериментально обнаружить магнитный монополю Дирака, да и вообще реально ли в принципе его присутствие в Природе. Делается вывод о том, что изолированный магнитный заряд, альтернативный электрическому заряду невозможен энергетически, более того, в противном случае существовали бы в виде обычных атомов, реализующих нашу Вселенную, аналогичные атомные структуры из магнитных зарядов, молекулы и так далее, вплоть до магнитной Вселенной – монстра, подобного Вселенной из антиматерии Дирака.

Известно [1], что законы электрических и магнитных явлений обладают большой степенью подобия. В обобщенной форме это наиболее наглядно иллюстрируется установленной во второй половине XIX века Дж. К. Максвеллом системой электродинамических уравнений электромагнитного поля с компонентами электрической \mathbf{E} и магнитной \mathbf{H} напряженности, где сходство структур уравнений для обоих компонентов действительно наблюдается:

$$\begin{aligned}
 \text{(a) } \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, & \text{(b) } \operatorname{div} (\varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}) &= \rho, \\
 \text{(c) } \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \lambda \mathbf{E} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, & \text{(d) } \operatorname{div} (\mu\mu_0 \mathbf{H}) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь ρ - объемная плотность стороннего электрического заряда, $\varepsilon\varepsilon_0$ и $\mu\mu_0$ - электрическая и магнитная абсолютные проницаемости, а λ - удельная электрическая проводимость материальной среды.¹⁾ В частности, для среды идеального диэлектрика ($\lambda = 0$) при ее локальной электронейтральности ($\rho = 0$) структуры уравнений \mathbf{E} и \mathbf{H} полей математически тождественны.

Данные уравнения получены Максвеллом обобщением эмпирических фактов и являются постулатами *классической электродинамики*, где само название этой области научного знания говорит о том, что источником электромагнитного поля являются электрические заряды и их движение в простран-

¹⁾ В работе используется международная система единиц (СИ), как наиболее удобная в описании и адекватная в представлении физической сути понятий электромагнетизма.

ве. Так уравнение (1b), которое называют *теоремой Гаусса о потоке вектора электрической индукции* $\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$, является прямым следствием фундаментального закона Кулона: $\mathbf{F}_{\text{Кул}} = (q_1q_2/4\pi\epsilon\epsilon_0r^3)\mathbf{r}$ и описывает результат электрической поляризации среды. А уравнение (1c) – *уравнение полного тока* получают из закона сохранения электрического заряда $\text{div } \mathbf{j} = -\partial\rho/\partial t$ с учетом (1b), где $\mathbf{j} = \lambda\mathbf{E}$ – закон Ома электропроводности. Следующее уравнение (1d) описывает результат магнитной поляризации (намагничивания) материальной среды ²⁾ и является калибровкой, уточняющей чисто вихревой характер магнитного поля в (1c), а также служит при его дифференцировании по времени $\partial/\partial t$ основой для уравнения (1a) – закона электромагнитной индукции Фарадея. Таким образом, традиционные электродинамические уравнения Максвелла (1) описывают проявление свойств именно и только электрического заряда.

Для расширения концептуальных представлений электромагнетизма физически заманчиво предположить, что наряду с реально наблюдаемыми положительными и отрицательными электрическими зарядами, порождающими в пространстве электрическое кулоновское поле [1], в Природе возможно существуют и свободные магнитные заряды – источники магнитного поля, отвечающего закону Кулона взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Правда, буквально математически точечных зарядов не существует (при нулевом объеме $\rho \rightarrow \infty$), однако физически *точечный заряд* – это заряженное тело на расстояниях его точечности, когда при перераспределении заряда в этом теле сила, действующая на пробный заряд, размещенный в пространстве на таких расстояниях, неизменна в пределах точности проводимых измерений.

Тогда учитывающие существование магнитных монополей теперь уже *электромагнитодинамические уравнения*, с формальной точки зрения будут структурно абсолютно симметричны, то есть (1a) и (1d) запишутся в виде

$$(a) \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\lambda^m \mathbf{H} - \mu\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (b) \quad \text{div } (\mu\mu_0 \mathbf{H}) = \rho^m, \quad (2)$$

λ^m – удельная магнитная проводимость среды и ρ^m – объемная плотность магнитного заряда. Здесь уравнение (2b) будет прямым следствием *магнитного за-*

²⁾ Часто даже в учебной литературе уравнение (1d) безосновательно называют теоремой Гаусса магнитного поля, хотя ее базы – закона Кулона для магнитных зарядов нет.

кона Кулона: $\mathbf{F}_{Кул}^m = (q_1^m q_2^m / 4\pi\mu\mu_0 r^3) \mathbf{r}$, а (2а) следует из закона сохранения магнитного заряда $\text{div } \mathbf{j}^m = -\partial\rho^m / \partial t$ с учетом (2b), $\mathbf{j}^m = \lambda^m \mathbf{H}$ - закон Ома магнитной проводимости. Конечно, все эти магнитные законы, как и сами гипотетические уравнения (2) нами лишь предполагаются. Кроме того, надо принять к сведению, что многолетние упорные поиски свободных магнитных зарядов остаются безуспешными, хотя закон Кулона магнитного взаимодействия в эксперименте действительно наблюдается, но только для магнитных полюсов на концах длинных намагниченных спиц.

В этой связи необходимо сказать, что возможность существования магнитного заряда, подобного электрическому заряду вызывает большие сомнения и кажется излишней еще и потому, что идет вразрез с гипотезой А. М. Ампера о токовой природе магнитного поля [1, 2], согласно которой магнетизм материалов обусловлен молекулярными электрическими токами. Именно Ампером экспериментально установлено (1820г.), что магнитное поле создается движением электрических зарядов, и в этом смысле *магнетизм является вторичным эффектом электричества*, а потому и литературу по электромагнетизму обычно называют *теорией электричества*. Неутешительный вывод следует и из электромагнитной теории Максвелла, где реальная асимметрия уравнений (1а) и (1с), (1b) и (1d) явно указывает на отсутствие магнитных зарядов и их токов.

И все же, несмотря на вышесказанное, каких-либо *физических законов и очевидных логических возражений против идеи существования магнитных монополей нет*. А потому в течение уже многих десятилетий вплоть до настоящего времени интерес к этой проблеме не ослабевает. Вот и мы представим себе, что в Природе существуют свободные магнитные заряды q^m с характеристиками, аналогичными электрическому заряду q^e , которые попытаемся определить. Причем в наших рассуждениях будем по возможности максимально оставаться в рамках известных твердо установленных фактов.

Для этого исследуем взаимодействие электрического заряда с магнитным полем, созданным предполагаемыми магнитными зарядами. Конкретно проведем стандартный анализ поведения элементарного *электрического заряда* - электрона « e » при его движении со скоростью \mathbf{v} ортогонально силовым линиям однородного статического поля магнитной индукции $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu\mu_0 \mathbf{H} = \text{const}$. Согласно теории электромагнетизма [1], взаимодействие движущегося электрического заряда с магнитным полем реализуется посредством магнитной состав-

ляющей силы Лоренца $F_{Лор} = e[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$, сообщаемой частице центростремительное ускорение $m^e v^2 / R = e v B$ (m^e - масса электрона), приводящее в данном случае к движению заряда по окружности радиуса R . Однако важно то, что согласно принципам *корпускулярно-волнового дуализма материи* [3] орбитальный момент (момент импульса) частицы, здесь это электрон, $L_z = e R^2 B$ квантуется, поскольку $L_z = m^e v R = (2\pi R / \lambda_B) \hbar = n \hbar$, где $n = 2\pi R / \lambda_B$ - целое число длин волн де Бройля частицы $\lambda_B = h / m^e v$, укладывающихся на траектории ее орбиты, $\hbar = h / 2\pi$ - модифицированная постоянная Планка.

А вот теперь воспользуемся нашим предположением, считая, что источником указанного магнитного поля являются гипотетические магнитные заряды q^m , распределенные идентично реальным электрическим зарядам q^e на пластинах плоского конденсатора. Тем самым мы переносим в теорию магнитного поля представления и методы, разработанные для электростатических полей, базой которых служит фундаментальный закон Кулона и его прямое следствие электростатическая теорема Гаусса [1]. Тогда уже из магнитоэлектростатической теоремы Гаусса (2b) в интегральной форме для потока вектора поля однородной магнитной индукции $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = const$ получим, что $B = \sigma^m = q^m / \pi R^2$, где σ^m и q^m - поверхностная плотность и интегральная величина магнитного заряда на площади πR^2 орбиты электрона. В итоге момент импульса электрона в магнитном поле определится как $L_z = e R^2 B = e q^m / \pi = n \hbar$. Откуда, наконец, находим квантованную (n - целые числа) величину магнитного заряда $q^m = n \cdot (h / 2e)$.

Таким образом, *квант магнитного заряда* ($n=1$) аналитически представится, как $q_{min}^m = m = h / 2e$, то есть произведение минимальных величин электрического « e » и магнитного « m » зарядов с точностью до постоянного множителя равно константе Планка: $e \cdot m = h / 2$, определяющей *квант действия* [2]. Именно из квантования углового момента вытекает квантование произведения $q^e \cdot q^m = n \cdot h / 2$. Итак, сравнительно простые рассуждения с привлечением базовой идеи волновой (квантовой) механики корпускулярно-волнового дуализма материи, позволили получить действительно фундаментальный результат.

Проведенный здесь анализ по существу является научно-популярной интерпретацией изложения известных рассуждений [2, 4-7], которые объединяются под общим названием *теория монополя Дирака*. Напомним, что гипотеза о

возможности существования магнитного монополя - частицы, обладающей положительным или отрицательным магнитным зарядом, была высказана П. А. М. Дираком (1931г.) с целью концептуального обоснования симметричной квантовой электродинамики, именно ее и называют монополем Дирака. К сожалению, монополь Дирака [2] не только остается экспериментально неуловимым, но и сами теоретические построения по этому вопросу не позволяют даже по порядку величины определить еще один важный параметр магнитного заряда – *массу его носителя*. Более того, и в перспективе прогресс не предвидится, поскольку нет единого мнения об оценке массы такого монополя. Справедливости ради надо сказать, что и *масса электрона* также не устанавливается настоящими теориями, являясь на сегодня чисто экспериментальным фактом.

Однако продолжим наши исследования, поскольку *выявление величины магнитного заряда* $q^m = n \cdot m = n \cdot (h/2e)$, квант которого определяется зарядом электрона e и их взаимное квантование со всей определенностью ставит вопрос о соответствии этих результатов нынешним полевым представлениям электромагнетизма, выяснению физико-математической адекватности аналитического описания электромагнитного поля с учетом этих данных.

Однако, прежде всего, хотелось бы понять, почему до настоящего времени экспериментально не удается обнаружить магнитных монополей, да и вообще возможны ли они в Природе. Выше показано, что система традиционных электродинамических уравнений (1), описывающих полевые свойства электрического заряда, аналогично гипотетические математически структурно симметричные уравнения Максвелла полевых характеристик равноправных электрических и магнитных зарядов (2) принципиально базируются на основополагающем законе Кулона взаимодействия соответствующих зарядов. А потому определим величину отношения сил Кулона взаимодействия пар неподвижных элементарных электрических « $e-e$ » и магнитных « $m-m$ » зарядов в вакууме:

$$\frac{F_{Кул}^e}{F_{Кул}^m} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} / \frac{m^2}{4\pi\mu_0 r^2} = \frac{e^2 \mu_0}{m^2 \epsilon_0} = \left(\frac{e}{m} Z_0 \right)^2, \quad (3)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ - импеданс пространства физического вакуума. Как видим, результат несомненно физически интересен, так как обе силы Кулона связаны друг с другом фундаментальными константами: $F_{Кул}^e = [(e/m)Z_0]^2 F_{Кул}^m$. Причем для зарядов, находящихся в вакууме на единичном расстоянии ($r = 1\text{м}$) друг от

друга эти силы численно равны $F_{Кул}^e = 2,3 \cdot 10^{-28} Н$ и $F_{Кул}^m = 2,7 \cdot 10^{-25} Н$, то есть сила кулоновского взаимодействия магнитных зарядов больше аналогичной электрической силы на 3 порядка: $F_{Кул}^m = 1,2 \cdot 10^3 F_{Кул}^e$.

Сделаем оценку энергетических затрат по реализации свободного заряда на примере процесса ионизации атома - характерной стационарной электронейтральной структуры, ³⁾ удовлетворяющей *теореме Ирншоу* [2]. Согласно теории Н. Бора атома водорода [3], формула минимальной энергии ионизации такого атома имеет вид $|E_1^e| = (m^e e^4) / (4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2$ и численно равна $|E_1^e| = 13,6 \text{ эВ}$. Тогда для *атомной структуры из магнитных зарядов* с учетом соотношений (3) несложно получить *боровскую формулу энергии ионизации* такого атома: $|E_1^m| = (m^m m^4) / (4\pi\mu_0)^2 2\hbar^2$ и численную оценку порядка ее величины (масса магнитного монополя неизвестна, а потому возьмем $m^m = m^e$) $|E_1^m| \sim 5,3 \cdot 10^7 \text{ эВ}$. Как видим, разделение на части магнитонейтральной структуры требует затрат *энергии* даже по минимуму на 6 порядков больше, в сравнение с аналогичной процедурой над ей подобной электронейтральной структурой.

И хотя атомы, их ядра и всякого рода элементарные частицы обладают магнитными моментами, однако многочисленные эксперименты по ионизации атомов, изучение ядерных реакций, анализ взаимодействия и распада элементарных частиц в отношении наблюдения свободных магнитных зарядов оказались безуспешными. Причем при энергиях больше 10^6 эВ получают множество различного сорта элементарных частиц с кратным заряду электрона электрическими зарядами и кратным постоянной Планка магнитными моментами, но и здесь свободных магнитных зарядов никто не наблюдал.

Однако теперь стало понятно, что энергия таких реакций для получения свободных магнитных зарядов должна быть даже по минимуму $\sim 10^{12} \text{ эВ}$. Таким образом, в любых физических процессах на современных установках, в том числе и на суперколлайдере (БАК) с энергией $\sim 1,3 \cdot 10^{13} \text{ эВ}$, создать магнитный монополь, энергетически невозможно. Одна надежда - это потоки частиц космических излучений, где энергия разного рода событий во Вселенной, образно говоря, беспредельна. Но и здесь многолетние упорные, технически сложные поиски монополя Дирака успеха пока не имели.

³⁾ Структура электронейтральна, если ее суммарный заряд равен нулю (диполь, квадруполь, ... , атом и т.д.), однако поле такой системы зарядов в пространстве существует.

Все это наводит на мысли о некоем вселенском запрете на магнитный монополь, обусловленным хотя бы тем, что в противном случае существовали бы в виде обычных атомов, реализующих нашу Вселенную, аналогичные атомные структуры из магнитных зарядов, молекулы и так далее, вплоть до магнитной Вселенной – монстра, подобного Вселенной из антиматерии Дирака.

Итак, приходится констатировать, что в условиях нашей действительности магнитные монополи не существуют, точнее, отдельно как источники магнитного поля они в явном виде не наблюдаются. А потому окончательно снимается вопрос о возможности ревизии системы традиционных электродинамических уравнений Максвелла (1) посредством придания их математической структуре абсолютной симметрии относительно компонент электрической \mathbf{E} и магнитной \mathbf{H} напряженности. Однако вполне достоверно установлено, что электричество и магнетизм как физические явления равноправны, где единство электрического и магнитного зарядов выражено в произведении величин их квантов, равного фундаментальной константе Планка: $e \cdot m = h/2$.

Кстати, можно предложить еще один аргумент в доказательство единства двух разнородных зарядовых сущностей q^e и q^m , если обратиться к проведенному выше анализу аналогичного движения, но уже элементарного магнитного заряда « m » в поле электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E} = const$, где взаимодействие заряда и поля обусловлено неким электрическим аналогом силы Лоренца $\mathbf{F}_{Лор}^e = q^m[\mathbf{v}, \mathbf{D}]$. Заметим, что здесь больше сомнительной для физика-ортодокса гипотетики (например, это сила $\mathbf{F}_{Лор}^e$). Однако, несмотря на замену электрического заряда магнитным, а магнитного поля электрическим, результат вычислений связи квантов этих зарядов в итоге окажется тем же самым: $e = h/2m$.

Таким образом, имеем парадоксальную ситуацию: с одной стороны, прямое наблюдение отдельных магнитных монополей энергетически невозможно либо их в Природе просто нет, а с другой, совместно и равноправно существуют электрические и магнитные заряды, произведение величин квантов которых с точностью до постоянного множителя равно константе Планка $e \cdot m = h/2$, определяющей *квант действия*. Данное соотношение иллюстрирует единство физических характеристик этих разнородных зарядов и явно указывает на реальность силового взаимодействия между ними, которое должно проявляться в виде некоторого поля, их объединяющего. Естественно, что здесь вполне очевид-

ны определенные сомнения в правомерности именно такой интерпретации полученных результатов, а потому необходима дополнительная аргументация.

С этой целью по аналогии с электрическим законом Кулона чисто формально запишем закон Кулона взаимодействия электрического и магнитного зарядов, который для пары элементарных зарядов « e - m » представится равенством соотношений:

$$F_{Кул}^{em} = \frac{em}{4\pi\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}r^2} = \frac{em}{4\pi r^2}c = \frac{\hbar c}{4r^2}, \quad (4)$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ - скорость света в вакууме. Видно, что данный результат физически примечателен и требует осмысления. Однако он нас интересует с конкретной целью выяснения допустимости такого, казалось бы, экзотического взаимодействия двух существенно разных зарядов. Согласно численным оценкам, абсолютное значение *электромагнитной силы Кулона* для указанных зарядов, находящихся в вакууме на единичном расстоянии ($r = 1$ м) друг от друга равно $F_{Кул}^{em} = 7,9 \cdot 10^{-27} \text{ Н}$. Для сравнения укажем электрическую силу Кулона « e - e » $F_{Кул}^e = 2,3 \cdot 10^{-28} \text{ Н}$ и магнитную « m - m » – $F_{Кул}^m = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ Н}$. Следовательно, *электромагнитное взаимодействие* разнородных « e - m » зарядов энергетически вполне реально и должно проявлять себя в Природе тем, что обе зарядовые сущности будут содержаться в одном и том же материальном носителе.

Такой вывод действительно подтверждается, поскольку известно [2, 3], что локальными (корпускулярными) электромагнитными характеристиками микрочастицы являются *электрический заряд* $q^e = n \cdot e$ (с учетом знака), определяющий ее электрические свойства и *собственный момент* $s = n \cdot (\hbar/2)$ – *спин*, ответственный за ее магнитные свойства, который, как теперь установлено, проявляет себя как магнитный заряд $q^m = n \cdot (\hbar/2e)$ частицы.

О возможной достоверности и физическом смысле выражения *кванта магнитного заряда* $m = \hbar/2e$ недвусмысленно говорит и его равенство фундаментальной константе - *кванту магнитного потока* [2]. Следуя аналогии полученным результатам по магнетизму, либо напрямую из электростатической теоремы Гаусса [1], *квант электрического заряда* - электрон e (протон p) надо считать *квантом электрического потока*. Обратим внимание на размерности зарядов с наводящей на размышления симметрией: q^m - [В·с = Вебер] - маг-

нитный поток и $q^e - [A \cdot c = \text{Кулон}]$ - электрический поток, где единицы измерения заряда и потока вектора поля соответствующей индукции тождественны.

Таким образом, электричество и магнетизм как физические явления равноправны и в них реально проявляется единство зарядовой и полевой симметрий, где единицы измерения заряда и потока вектора поля соответствующей индукции определяются одинаково. Тем самым представленные результаты отвечают концепции *корпускулярно-полевого дуализма* электромагнитных характеристик материи посредством единства свойств частицы материи и ее поля в реальном пространстве физического вакуума, в отличие от известных принципов *корпускулярно-волнового дуализма*, где материальная частица представляется волной вероятности в абсолютно пустом, абстрактном пространстве.

Итак, равноправное единство сущностно разных зарядов объективно, а потому поля таких зарядовых объединений должны быть структурно более сложными, нежели нынешние, и для описания характеристик которых необходимы уравнения другого глубинного уровня, более фундаментальные. При этом одним из критериев адекватности этих новых *электромагнитодинамических уравнений* существующим реалиям будет то, что они обязательно должны содержать в себе в виде составной части традиционные уравнения Максвелла электромагнитного поля с компонентами электрической E и магнитной H напряженности (1), фундаментальность которых не подлежит сомнению.

По этой причине полагаем это гипотетическое первичное поле зарядовых сущностей также векторным, где его электрическая вектор-компонента A^e порождена электрическим зарядом микрочастицы $q^e = n \cdot e$, а магнитная компонента A^m - удельным (на единицу заряда) моментом, который, как установлено выше, является магнитным зарядом частицы, кратным кванту магнитного потока $q^m = n \cdot (h/2e)$. Наша дальнейшая задача - разобраться, что должно представлять собой такое поле, каким образом можно аналитически описать его физические свойства и в итоге построить уравнения функциональной взаимосвязи компонент этого гипотетического поля A^e и A^m с реально наблюдаемыми в настоящее время компонентами электромагнитного поля в виде электрической E и магнитной H напряженностей. Детальный анализ вопроса по только что сформулированной задаче наиболее полно проведен в работах [8, 9]. ⁴⁾

⁴⁾ Вообще говоря, цель, вынесенная в название настоящей статьи, как нам представляется, полностью достигнута.

Однако для сохранения методической целостности содержания данной работы обозначим последующие основные результаты и положения анализа в конспективной форме. Поскольку компоненты обсуждаемого первичного поля есть векторные функции пространственно-временных переменных, то описывающие их поведение дифференциальные уравнения наиболее просто можно получить действием на $A^e(\mathbf{r}, t)$ и $A^m(\mathbf{r}, t)$ пространственной производной первого порядка (оператор «набла») ∇ со свойствами вектора и скалярной частной временной производной $\partial / \partial t$.

Итак, рассмотрим действие оператора «набла» и частной временной производной на векторные функции обсуждаемого здесь гипотетического поля. Так как операция «ротора» превращает линейный вектор в потоковый, то функции $A^e(\mathbf{r}, t)$ и $A^m(\mathbf{r}, t)$ считаем полями *линейных* векторов. В этом случае мы получим два (из трех возможных) варианта записи действия указанных операторов: $\text{rot } A^e$ и $\text{rot } A^m$, $\partial A^e / \partial t$ и $\partial A^m / \partial t$.

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

$$(a) \text{ rot } A^e = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}, \quad (b) \text{ rot } A^m = \mu\mu_0\mathbf{H}. \quad (5)$$

Предполагается, что компонента A^e поля микрочастицы есть полевой эквивалент ее электрического заряда, создающего электрическое поле, а компонента A^m порождается спином (магнитным зарядом) - источником магнитного поля.

Очевидно, что действие скалярного оператора частной временной производной $\partial / \partial t$ на векторную функцию не меняет ее геометрические свойства, то есть получаемые при этом новые векторы $\partial A^e / \partial t$ и $\partial A^m / \partial t$ останутся линейными (циркуляционными) векторами. А потому функциональная связь полей $\partial A^e / \partial t$ или $\partial A^m / \partial t$ возможна только с компонентами электромагнитного поля линейных векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} напряженностей, причем для однозначного выбора пар этих компонент надо учесть, что о равенстве векторов можно говорить

только при их коллинеарности. В качестве существенного уточнения заметим, что, согласно соотношениям (5), векторы в парах A^e и E , соответственно, A^m и H взаимно ортогональны. Таким образом, с необходимостью приходим к однозначным соотношениям $E = -\partial A^m / \partial t$ и $H = \partial A^e / \partial t$, которые, однако, нельзя считать окончательными. Ведь в наших рассуждениях не отражена принципиально важная характеристика материальной среды – ее электрическая проводимость λ , которой в той или иной мере обладают все реальные среды.

Как известно [1], процесс электропроводности описывается законом Ома $j = \lambda E$, где электрическое поле в проводнике с током потенциально: $\text{rot } E = 0$, то есть не может быть вихревым. Следовательно, полученное ранее соотношение $E = -\partial A^m / \partial t$ является окончательным. Однако вихревое магнитное поле электрического тока существует. Это следует из закона сохранения заряда $\text{div } j + \partial \rho / \partial t = 0$, когда подстановки в него выражений закона Ома $j = \lambda E$, теоремы Гаусса $\text{div } (\epsilon \epsilon_0 E) = \rho$ и соотношения (5а) дают $\text{rot } H = \text{rot } (A^e / \tau_{\text{рел}} + \partial A^e / \partial t)$, где ρ - объемная плотность стороннего заряда, а $\tau_{\text{рел}} = \epsilon \epsilon_0 / \lambda$ - постоянная времени релаксации заряда в среде за счет ее электропроводности. В итоге искомые соотношения для вихревых E и H полей запишутся окончательно

$$(a) \quad E = -\partial A^m / \partial t, \quad (b) \quad H = A^e / \tau_{\text{рел}} + \partial A^e / \partial t. \quad (6)$$

В соотношениях (5) ротор функций не равен нулю, что говорит о *вихревом* характере компонент первичного поля A^e и A^m . Математически чисто вихревые свойства поля указанных компонент определим дивергентными уравнениями в виде так называемых соотношений кулоновской калибровки:

$$(a) \quad \text{div } (\mu \mu_0 A^e) = 0, \quad (b) \quad \text{div } (\epsilon \epsilon_0 A^m) = 0. \quad (7)$$

Здесь однозначное преобразование линейных векторов A^e и A^m в потоковые векторы $\mu \mu_0 A^e$ и $\epsilon \epsilon_0 A^m$, аналогичные векторам электрической $D = \epsilon \epsilon_0 E$ и магнитной $B = \mu \mu_0 H$ индукций, получено на основе соотношений (6).

Таким образом, собирая полученные в наших физико-математических рассуждениях соотношения (5) - (7) вместе, приходим к системе дифференциальных уравнений функциональной связи компонент гипотетического поля A^e и A^m с реально наблюдаемыми в настоящее время компонентами электромагнитного поля в виде электрической E и магнитной H напряженностей:

$$(a) \operatorname{rot} \mathbf{A}^e = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (b) \operatorname{div} (\mu \mu_0 \mathbf{A}^e) = 0, \quad (c) \mathbf{H} = \frac{\mathbf{A}^e}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t},$$

$$(d) \operatorname{rot} \mathbf{A}^m = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (e) \operatorname{div} (\varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{A}^m) = 0, \quad (g) \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t}. \quad (8)$$

Как видим, данная система уравнений (8) фундаментальна и описывает свойства весьма необычного с точки зрения традиционных представлений *вихревого векторного электромагнитодинамического поля*, состоящего из четырех неразрывно связанных векторных компонент \mathbf{A}^e , \mathbf{A}^m , \mathbf{E} и \mathbf{H} , которое, однако, условно можно назвать *реальное электромагнитное поле*.

Логика требует, что если уравнения (8), согласно реализованному здесь плану их построения, являются основополагающими в теории электромагнитного поля, то обязательным следствием из них должна быть система традиционных уравнений Максвелла классической электродинамики для полей \mathbf{E} и \mathbf{H} напряженностей (1). И действительно, векторное действие оператора «набла» на соотношения (8с) и (8g) с подстановкой в этот результат соотношений (8а) и (8d), и, соответственно, скалярное действие оператора «набла» на (8а) и (8d) дают нам (поскольку $\operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{a} = 0$) классические уравнения *электромагнитного поля* (1) для случая сред с локальной электронейтральностью ($\rho = 0$).

Легко убедиться, что уравнения (1) содержат в себе закон сохранения электромагнитной энергии, которой аналитически формулируется в виде так называемой теоремы Пойнтинга:

$$\mathbf{H} \operatorname{rot} \mathbf{E} - \mathbf{E} \operatorname{rot} \mathbf{H} = \operatorname{div} [\mathbf{E}, \mathbf{H}] = -\lambda(\mathbf{E}, \mathbf{E}) - \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu \mu_0 \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (9)$$

Поскольку *дивергенция*, согласно теореме Гаусса-Остроградского, представляет собой объемную плотность потока векторного поля в данной точке, то поступающий извне поток энергии $\operatorname{div} [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$ компенсирует в данной точке среды джоулевы (тепловые) потери при электропроводности (первое слагаемое справа) и изменяет электрическую и магнитную энергии, либо наоборот. Как видим, система уравнений (1) и соотношение баланса (9) описывают *процессы диссипации (рассеяния) электромагнитной энергии в пространстве*.

Сделаем важное замечание. Именно уравнения Максвелла (1), полученные нами из более общей исходной системы уравнений (8) способны ответить на один из центральных вопросов наших исследований: что представляет собой собственное первичное поле электрического q^e и магнитного q^m зарядов мик-

рочастицы, введенное нами на основе концепции корпускулярно-полевого дуализма электромагнитных характеристик материи.

Ответ формулируется так: если дивергенция ротора любого векторного поля тождественно равна нулю, то из дивергентного уравнения (1b) при $\rho = 0$ $\operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}) = 0 = \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{A}^e$ следует соотношение (8a), соответственно, из (1d) $\operatorname{div}(\mu\mu_0\mathbf{H}) = 0 = \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{A}^m$ имеем соотношение (8d), посредством которых вводят, как известно, понятие именно компонент векторного электромагнитного потенциала [10, 11]. Итак, мы убедились, что *компоненты гипотетического первичного поля \mathbf{A}^e и \mathbf{A}^m действительно однозначно являются полями соответственно электрической и магнитной компонент векторного потенциала, принципиально сопутствующего электрической или магнитной поляризации материальной среды. По их физическому смыслу, как в показано в [8, 9, 11], они есть полевые эквиваленты локальных электромагнитных параметров частиц материи: электрического q^e и магнитного q^m зарядов.*

И еще важное. Из уравнений исходной системы (8) также следуют структурно аналогичные системе (1) полностью равноправные еще три системы уравнений для других пар вихревых компонент *реального электромагнитного поля*. Например, систему уравнений, которая рассматривает области пространства для поля электромагнитного векторного потенциала с электрической \mathbf{A}^e и магнитной \mathbf{A}^m компонентами получаем так: уравнение (10a) - это подстановка (8g) в (8a), аналогично уравнение (10c) - подстановка (8c) в (8d). Следующее уравнение (10b) тождественно (8b), а (10d) - это (8e). В итоге все это дает

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

Далее можно получить систему уравнений чисто электрического поля с компонентами \mathbf{E} и \mathbf{A}^e : уравнение (11a) векторным действием оператора «набла» на соотношение (8g) при затем последовательной подстановке в него (8d) и (8c), уравнение (11c) тождественно (8a), соответственно (11d) - это (8b), а (11b) следует при скалярном действии «набла» на (8a). Таким образом, имеем

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

$$(c) \operatorname{rot} \mathbf{A}^e = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (d) \operatorname{div}(\mu \mu_0 \mathbf{A}^e) = 0. \quad (11)$$

Подобными математическими действиями приходим к системе уравнений чисто магнитного поля с компонентами \mathbf{H} и \mathbf{A}^m : уравнение (12a) векторным действием оператора «набла» на (8c) при последовательной подстановке в него (8a) и (8g), уравнение (12c) тождественно (8d), соответственно (12d) - это (8e), а (12b) результат скалярного действия «набла» на (8d). Объединяя, получим

$$(a) \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{A}^m}{\tau_{\text{рел}}} + \frac{\partial \mathbf{A}^m}{\partial t} \right), \quad (b) \operatorname{div}(\mu \mu_0 \mathbf{H}) = 0, \\ (c) \operatorname{rot} \mathbf{A}^m = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (d) \operatorname{div}(\varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{A}^m) = 0. \quad (12)$$

Как и должно быть, из этих новых систем уравнений аналогично выводу формулы (9) непосредственно получаем соотношения баланса: для *потока момента ЭМ импульса* из уравнений системы (10)

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

для *потока электрической энергии* из уравнений системы (11)

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

и, наконец, для *потока магнитной энергии* из уравнений системы (12)

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

Здесь необходимо сделать концептуально важное замечанием о *моменте импульса электромагнитного поля*, дискуссия о котором продолжается многие десятилетия [12, 13] и носит, на наш взгляд, тупиковый характер. Проблема здесь состоит в том, что все попытки описать данную характеристику поля предложенным в порядке гипотезы из механических аналогий *вектором момента импульса электромагнитного поля* $\mathbf{L} = [\mathbf{r}, \mathbf{S}] / c^2$ ($\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$ - *вектор Пойнтинга*) оказываются в конечном итоге несостоятельными, поскольку из решений электродинамических уравнений Максвелла (1) момент импульса электромагнитного поля принципиально никак не следует, даже при расчете действия на материальную среду циркулярно поляризованной волны.

Однако очевидно, что физически электромагнитное излучение – это излучение возбужденными атомами избытка энергии в виде фотонов, которые заби-

рают от атома не только часть энергии, но и уносят долю внутреннего углового момента атома. Следовательно, распространяющееся в виде волн электромагнитное поле обладает определенной величиной момента импульса, что, кстати, наблюдалось в эксперименте [12, 13]. Причем в [6] указывается на тот факт, что *угловой момент поля* создается системой, состоящей из одного электрического q^e и одного магнитного q^m зарядов, где сам угловой момент квантован и зависит лишь от произведения величин зарядов, но не зависит от расстояния между ними, а наименьшее значение этого произведения равно постоянной Планка. Как видим, все это подтверждено и нашими исследованиями: $e \cdot m = h/2$.

Таким образом, на основе установленного равноправного единства зарядовой и полевой симметрий в физических явлениях электричества и магнетизма выявлено структурно более сложное *электромагнитодинамическое поле* существенно разных зарядовых объединений, состоящее из четырех неразрывно связанных полевых векторных компонент A^e , A^m , E и H . А потому для описания характеристик такого поля были получены исходные более фундаментальные первичные уравнения, другого глубинного уровня (8), где система нынешних электродинамических уравнений Максвелла (1) - это всего лишь рядовое частное следствие.

Здесь удивляет махровая ортодоксальность и зашоренность «жрецов высокой науки и ее просветителей» в их маниакальном устремлении не замечать способность к развитию электромагнитной теории, ведь, по их словам, «данная область знания наиболее полно разработана во всех ее аспектах, и настоящий ее уровень является вершиной человеческого гения». При этом даже прямое следствие уравнений Максвелла - *векторные потенциалы* они считают, вторя Г. Герцу, вспомогательными функциями, облегчающими решение этих уравнений. Скорее всего, это и есть одна из главных причин концептуального застоя в классической электродинамике, которая после Максвелла как наука уже не развивалась, несмотря на грандиозные успехи внедрения технических достижений электромагнетизма во многих областях жизни человеческого общества.

Как и можно было ожидать, из этих электромагнитодинамических уравнений (8) непосредственно следует много нового в развитии корпускулярно-полевых представлений электромагнетизма [9, 14]. В частности, это система уравнений *поля векторного электромагнитного потенциала* с электрической A^e и магнитной A^m компонентами (10), являющиеся полевыми эквивалентами электрического q^e и магнитного q^m зарядов - источника *углового момента*

такого поля. Наглядно все это иллюстрируется полученным на основе системы уравнений (10) *полевым соотношением баланса* (13), последовательно описывающим перенос в пространстве и процесс излучения *момента импульса электромагнитного поля*, свойства и его основные характеристики.

Литература

1. *Матвеев А.Н.* Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980.
2. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
3. *Толмачев В.В., Скрипник Ф.В.* Квазиклассическая и квантовая теория атома водорода. М. –Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.
4. *Дэвонс С.* Поиски магнитного монополя // *Успехи физических наук.* 1965. Том 85. Вып. 4. С. 755-762.
5. *Стражев В.И., Томильчик Л.М.* Современное состояние проблемы монополя Дирака // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 1973. Том. 4. Вып. 1. С. 187-224.
6. *Карриган Р.А., Трауэр У.П.* Сверхтяжелые магнитные монополи // *Успехи физических наук.* 1983. Том 139. Вып. 2. С. 333-346.
7. *Коулмен С.* Магнитный монополь пятьдесят лет спустя // *Успехи физических наук.* 1984. Том 144. Вып. 2. С. 277-340.
8. *Сидоренков В.В.* Физико-математические принципы аксиоматического построения уравнений электромагнитного поля // *SciTecLibrary /от 06.11.09г./* <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10004.html> .
9. *Сидоренков В.В.* Физико-математические принципы построения и анализ полевых уравнений электромагнетизма. <http://scipeople.ru/users/8652252/>
10. *Сидоренков В.В.* Обобщение физических представлений о векторных потенциалах в классической электродинамике // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2006. № 1. С. 28-37.
11. *Сидоренков В.В.* Фундаментальные основы электродинамической теории нетеплового действия электромагнитных полей на материальные среды // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2007. Т.3. № 11. С. 75-82.
12. *Вульфсон К.С.* О моменте количества движения электромагнитных волн // *Успехи физических наук.* 1987. Том 152. Вып. 4. С. 667-674.
13. *Соколов И.В.* Момент импульса электромагнитной волны, эффект Садовского и генерация магнитных полей в плазме // *Успехи физических наук.* 1991. Том 161. № 10. С. 175-190.
14. *Сидоренков В.В.* Концептуальный анализ современной полевой теории электромагнетизма // *SciTecLibrary /от 23.04.09г./* <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9675.html> .