

О СООТНОШЕНИИ МАГНИТНЫХ ВЕКТОРНЫХ ВЕЛИЧИН И ПРЕДПОЛАГАЕМОМ ФИЗИЧЕСКОМ СМЫСЛЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Чуев А.С., к.т.н.

Контакт с автором: chuev@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана

С некоторыми устойчивыми заблуждениями в области электромагнетизма, в частности, в сфере физических величин (ФВ), используемых для описания магнитного поля, помогает разобраться система физических величин и закономерностей (ФВиЗ) [1, 2].

Согласно этой системе электромагнитные ФВ подразделяются на следующие группы и подгруппы:

- **базовые электромагнитные величины**; в данную группу входят такие величины, как *электрический заряд, сила тока, плотность тока, поляризованность диэлектриков, намагниченность магнетиков, напряженность магнитного поля* и т.п.;

- **полевые электромагнитные величины**; в данную группу входят: *напряженность электрического поля, индукция магнитного поля, электрический скалярный потенциал, магнитный векторный потенциал* и т.п.;

- **структуро-средовые электромагнитные величины первой подгруппы**; в подгруппу входят: *электрическая емкость, проводимость, электрическая постоянная* (диэлектрическая проницаемость вакуума) и т.п.;

- **структуро-средовые электромагнитные величины второй подгруппы**; в подгруппу входят: *индуктивность, электрическое сопротивление, магнитная постоянная* (магнитная проницаемость вакуума) и другие системно подобные величины.

Наличие в системе ФВиЗ двух подгрупп структуро-средовых величин, противоположных по размерности, дает основание предположить, что одна из подгрупп просто лишняя [3]. Основным кандидатом на роль лишней подгруппы является вторая, поскольку ФВ этой подгруппы имеют линейные системные связи с базовыми динамическими ФВ типа *энергии* и *силы* [2] через полевые электромагнитные величины (рис.1). Подозревать «лишними» базовые электромагнитные ФВ очевидно менее оправдано.

Вывод о том, что полевые электромагнитные величины, скорее всего, лишние и не существуют большинству сегодня представляется вздорным и надуманным. Но факты – вещь упрямая. В дополнение к системным фактам имеются и другие.

Далее рассмотрим магнитные ФВ, среди которых главной обычно считается *индукция магнитного поля \mathbf{B}* . На рис.2 показана ее системная связь с другими не полевыми ФВ.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

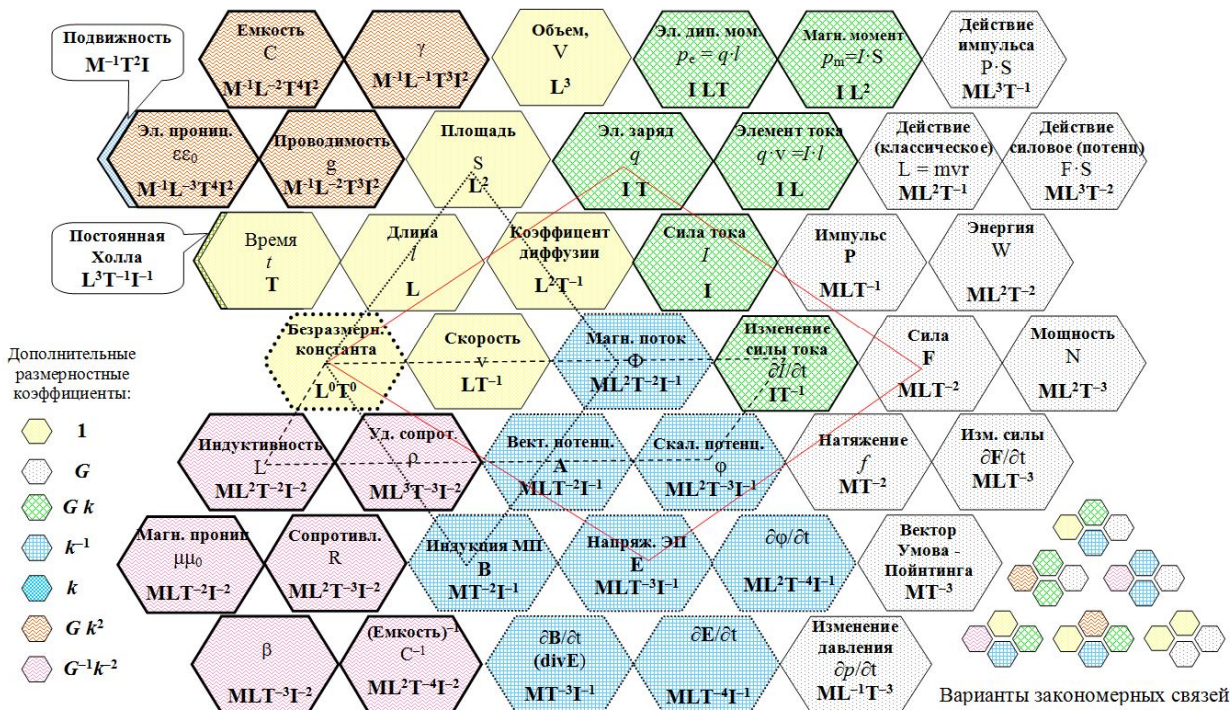


Рис.1. Изображение системы ФВиЗ в части электромагнитных величин

Схема образования полевых электромагнитных ФВ как соотношений зарядо-токовых и структуро-средовых величин

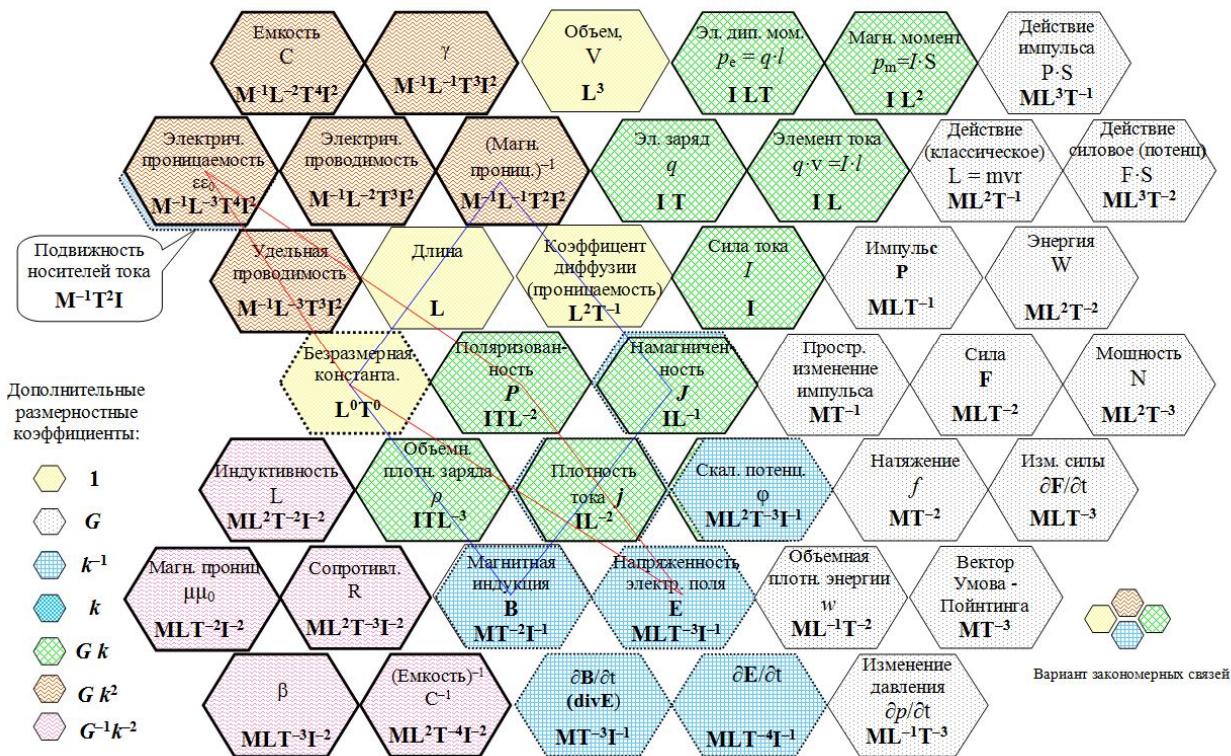


Рис.2. Системная взаимосвязь намагниченности и магнитной индукции (параллелограмм синего цвета)

На рис.1 и рис.2 приведены лишь отдельные частные изображения системы ФВиЗ с преимущественным показом электромагнитных величин. Вообще же система ФВиЗ представляет собой многоуровневую объемную конструкцию, которую трудно (даже невозможно) отобразить в планарном исполнении (на одной плоскости). Для отображения всей системы ФВиЗ следует использовать электронный вариант системы [1] или придется пользоваться еще несколькими отдельными изображениями, что оказывается необходимым при достаточно полном рассмотрении большинства ФВ и их закономерных связей в такой сложной области, какой является сфера электромагнетизма.

Система ФВиЗ помогает понять принципиальную разницу между различными группами электромагнитных величин, осознать особый (расчетно-вспомогательный) статус полевых величин и не допускать их смешивания с базовыми электромагнитными величинами, что зачастую встречается на практике. Для примера можно привести используемые наименования: *напряженность магнитного поля \vec{H}* и *индукция электрического поля \vec{D}* . Эти величины системно относятся к базовым электромагнитным величинам и полевыми они названы лишь по недоразумению. Так сложилось исторически, поэтому эти названия используют до сих пор.

Завершая вводную часть, приступим к анализу формульных и наглядных соотношений магнитных, по большей части векторных, величин. Предваряя этот анализ, заметим, что его результаты оказались во многом созвучны вышеизложенному выводу по результатам системного анализа – без полевых ФВ в сфере магнетизма вполне можно обойтись.

В магнетизме принято использовать известное формульное соотношение трех магнитных векторов:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}, \quad (1)$$

где: \vec{B}/μ_0 - отношение *магнитной индукции* к *магнитной постоянной*; \vec{H} - *вектор напряженности магнитного поля*; \vec{J} - *намагниченность* вещественной среды.

Обычно представляют поле вектора \vec{B} первичным, поле вектора \vec{J} вторичным, возникающим под действием первичного поля, а поле вектора \vec{H} составным и вспомогательным, не имеющим глубокого физического смысла [4, 5].

Однако, если соотношение (1) представить в форме сложения векторов:

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{J}, \quad (2)$$

то проявляется совсем иной смысл. Вектор \vec{B}/μ_0 оказывается составным и вспомогательным, а векторы \vec{H} и \vec{J} будут исходными и первичными, о чем будет пояснено далее.

Автор исходит из того, что вектор \vec{H} образуется токами проводимости и только ими, поскольку циркуляция этого вектора по замкнутому контуру всегда равна сумме токов проводимости. Поскольку есть несогласные с таким мнением, то в оправдание такого взгляда приведем цитаты двух достаточно авторитетных источников. Из книги Матвеева А.Н.: «...одинаковые токи проводимости возбуждают одинаковые напряженности магнитного поля в вакууме и однородном безграничном магнетике» [6, стр. 271]. Из книги Ландау Л.Д. и Лифшица Е.М.: «...наличие среды приводит лишь к изменению магнитной индукции в μ раз; напряженность же $\vec{H} = \vec{B}/\mu$ (примеч. здесь используется размерностная система Гаусса) вообще не изменяется» [7, стр. 162].

Связь намагниченности J и напряженности H магнитного поля через восприимчивость χ магнетика известна

$$J = \chi H, \quad (3)$$

она, чаще всего, не подвергается сомнению. Не сомневается в этом соотношении и автор данной статьи.

Две исходные составляющие вектора \vec{B}/μ_0 - напряженность магнитного поля \vec{H} и намагниченность \vec{J} магнетика совпадают по размерности и относятся к базовым электромагнитным величинам. При сложении этих составляющих соблюдается принцип суперпозиции векторных величин.

Индукция магнитного поля B по системе ФВиЗ относится к полевым величинам, она не имеет модельного представления и, возможно, как и все полевые электромагнитные величины в реальности вообще не существует [3].

Наглядное изображение соотношения магнитных векторов для однородных магнетиков, первично намагничиваемых от токов проводимости, приведено на рис.3.

Соотношения магнитных векторов

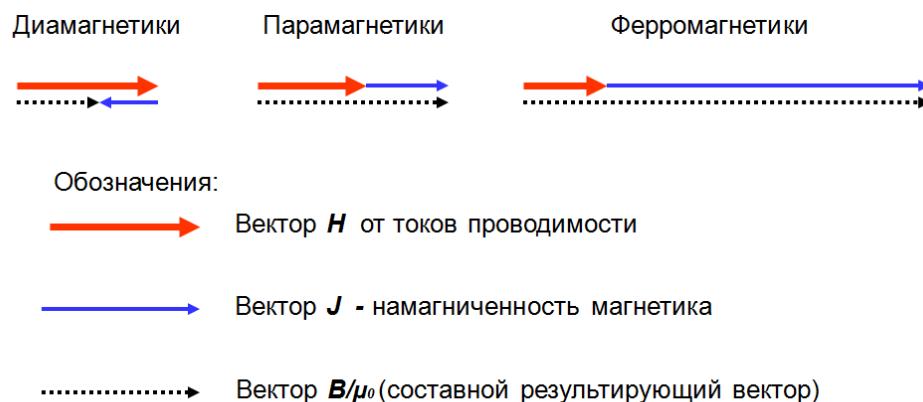


Рис.3. Соотношения векторов: \vec{H} (красный), $\vec{J} = \chi\vec{H}$ (синий), $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$ (черный)

Рисунок 3 убедительно иллюстрирует первичность вектора \vec{H} и различный отклик на него в различных магнетиках - в виде вектора намагниченности \vec{J} , различного по величине и направлению. В варианте с ферромагнетиком результирующее магнитное поле формируется, в основном, за счет реакции магнетика. Очевидно, что вектор \vec{B}/μ_0 присутствует на всех трех частях изображения рис.3 как составной результирующий вектор, поэтому он никак не может быть первичным.

Соотношение (2) тоже иллюстрирует нам, что поле B (точнее, \vec{B}/μ_0) не первично, а является составным. Источниками этого поля являются токи проводимости, выражаемые в каждой точке окружающего пространства вектором \vec{H} , и молекулярные токи (магнитные моменты молекул), объемное пространственное действие которых выражает вектор намагниченности \vec{J} .

Важность правильного представления о том, какие магнитные векторы первичны, а какой вектор (один из трех) является составным, покажем рассмотрением примера (7.3) из учебника Иродова [4].

На рис.7.19 учебника приведено (ошибочное, на наш взгляд) изображение полей \vec{B} и \vec{H} , создаваемых прямым длинным тонким проводником с током, лежащем в плоскости, отделяющей пространство, заполненное непроводящим магнетиком с проницаемостью μ , от вакуума. Данное изображение приведено на рис.4.

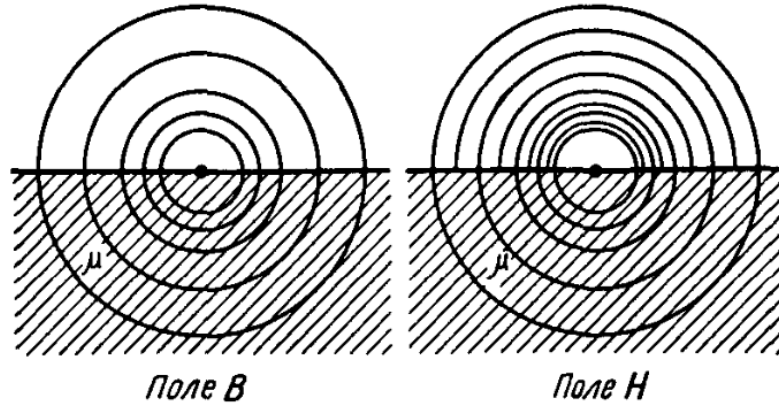


Рис.4. Изображения (по Иродову) полей \mathbf{B} и \mathbf{H} от проводника с током

На рис.4 поле вектора \mathbf{B} показано одинаковым как внутри магнетика, так и в вакууме, а результирующее (по Иродову) поле \mathbf{H} внутри магнетика показано ослабленным, при этом тип магнетика не указан.

Ошибочность изображений рис.4 состоит в том, что здесь не учитывается то, что в данном конкретном примере вектор \mathbf{B} на границе двух сред имеет только нормальную составляющую и не меняться он не может. Поле \mathbf{B} будет различным в вакууме и в магнетике по закону Био-Савара-Лапласа, который учитывает наличие среды с той или иной магнитной проницаемостью ($\mu \neq 1$). Поэтому в магнетике поле \mathbf{B} обязательно будет усиленным или ослабленным, а потому оно неизбежно оказывается и составным – как сумма двух исходных полей.

С учетом соотношения (2) и рис.3 данный пример, по мнению автора статьи, должен иметь следующие иллюстрации, приводимые для большей ясности отдельно для разных магнетиков (рис.5 и рис.6).

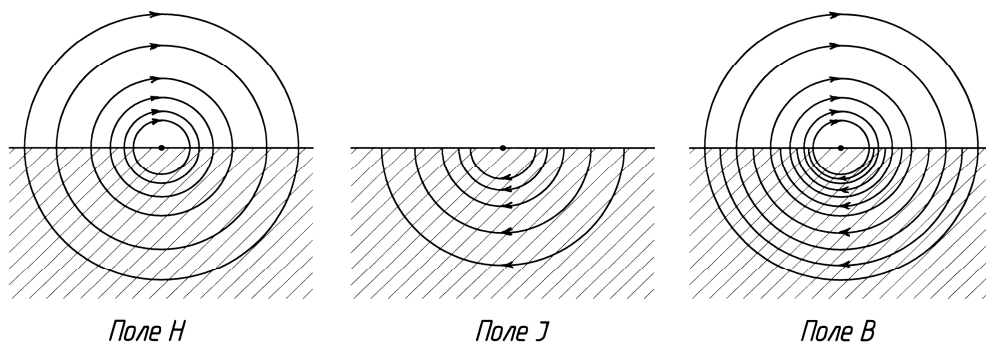


Рис.5. Магнитные поля от проводника с током на границе вакуум-парамагнетик и вакуум-ферромагнетик

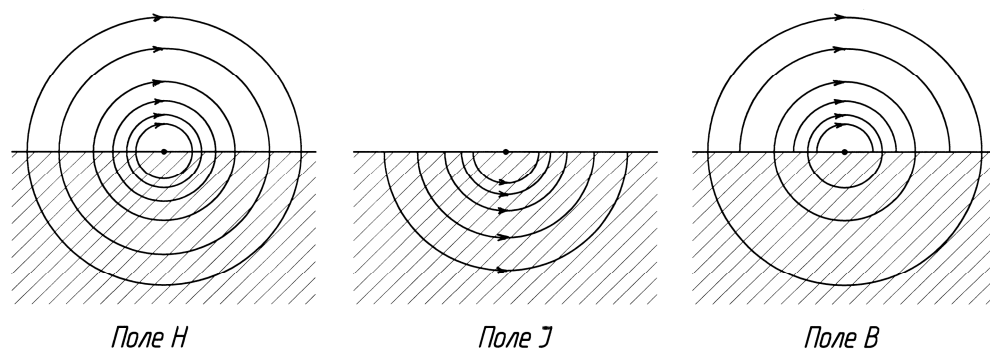


Рис.6. Магнитные поля от проводника с током на границе вакуум-диамагнетик

Возможно линии поля \mathbf{J} на поверхности магнетика, где имеются молекулярные токи намагничивания, не оканчиваются на этих токах, а рассеиваются вблизи поверхности или частично уходят в бесконечность, но это уже детали. Основные аспекты рисунков 5 и 6 следующие: в диамагнетике поле \mathbf{J} направлено против первичного токового поля \mathbf{H} , ослабляя его, а в парамагнетиках и ферромагнетиках поле \mathbf{J} совпадает по направлению с первичным полем \mathbf{H} , усиливая его. Таким образом, составным и деформированным оказывается результирующее поле \mathbf{B} , при этом соблюдается методологически верный принцип суперпозиции.

Возможное такое возражение: а как же быть с тем, что на границе двух сред получается $\text{div}\vec{B} \neq 0$? Ответ: да, на границе раздела магнетиков и в неоднородных магнетиках при воздействии внешнего магнитного поля дивергенция вектора \mathbf{B} (при отсутствии тангенциальной составляющей) может быть неравной нулю. На границе раздела двух магнетиков (особенно если одна из сред является ферромагнетиком) всегда будет, хоть и плавный, но переход от одной величины намагниченности среды к другой. В вузовских учебниках по магнетизму об этом говорится достаточно аккуратно, как о непрерывности нормальной составляющей вектора \mathbf{B} на границе раздела двух магнетиков. В принципе эта фраза верная, плавный переход из одного состояния в другое относится к непрерывности.

В приведенных размышлениях о составном и вторичном характере поля вектора \vec{B} почти не упоминалась *относительная магнитная проницаемость* - μ , которая фигурирует в известном соотношении двух векторов:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}. \quad (4)$$

Но представление вектора \vec{B} по этой формуле (если конечно не считать поле \mathbf{B} первичным) вовсе не исключается. Большая величина относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков обеспечивает то, что небольшое по интенсивности поле \mathbf{H} приводит к появлению в них и вблизи них поля \mathbf{B} большой интенсивности. Рассуждать или видеть обратное, означает не соответствовать элементарной логике.

Известная взаимосвязь *относительной магнитной проницаемости* μ и *магнитной восприимчивости* χ , следующая из соотношений (2) - (4), остается неизменной:

$$\mu = (1 + \chi). \quad (5)$$

Представление полевого вектора \vec{B} , как суммы двух первичных неполевых (можно сказать «материальных» [2]) векторов \vec{H} и \vec{J} , умножаемых на *магнитную постоянную* μ_0 , которая системно относится к структуро-средовым электромагнитным величинам, ставит под вопрос вообще объективность существования поля \mathbf{B} как такового или, по крайней мере, показывает возможность описания магнитного поля без использования этой физической величины.

Рассмотренные соотношения магнитных векторных величин и сопутствующие им величины изображены в виде наглядной архитектурной модели, приведенной на рис.8. Стрелки, идущие от *напряженности магнитного поля* \mathbf{H} , иллюстрируют первичность данной величины по сравнению с другими.

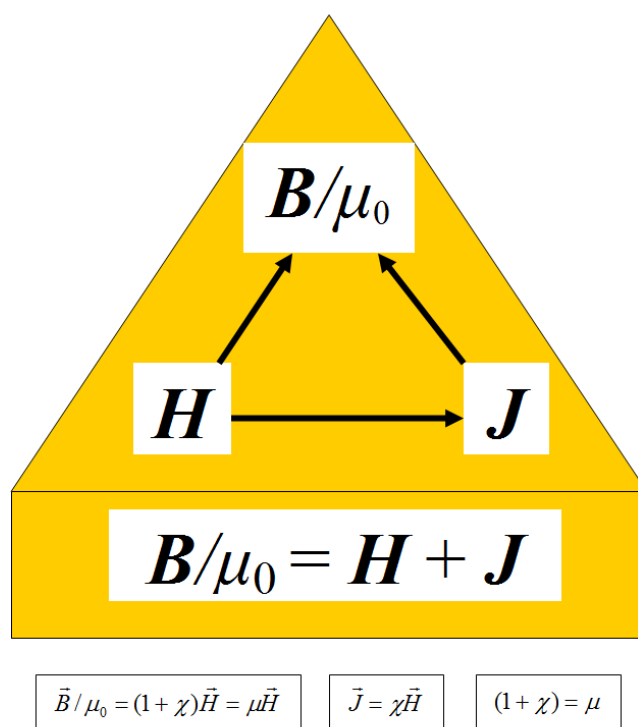


Рис.7. Архитектура магнитных векторных величин

Если магнитной индукции \mathbf{B} , как полевой физической величины нет, и мы не можем ее представить в виде наглядной модели, а магнитное поле в реальности есть, то что же такое магнитное поле с физической точки зрения? Если обратиться к выражению (2), то оно говорит нам о том, что магнитное поле – это сумма двух векторных величин. Это намагниченность вещественной среды \mathbf{J} и поле \mathbf{H} , которые совпадают по размерности, а скорее все-

го, совпадают с физической точки зрения и во многом остальном. Поэтому поле \mathbf{H} на полном основании можно называть намагниченностью вакуума и обозначать \mathbf{J}_0 .

Известно, что в любой точке пространства, в том числе в вакууме [8], присутствуют виртуальные частицы, обладающие своими *магнитными дипольными моментами*. Скорее всего, эти виртуальные частицы способны определенным образом ориентироваться в пространстве, окружающем токи проводимости (токи смещения, тоже), а также в пространстве, окружающем каждую молекулу и атом вещества. Тем самым они и создают так называемое магнитное поле.

В таком случае физический смысл поля \mathbf{B} в вакууме (точнее, отношения \vec{B}/μ_0 , где μ_0 играет роль размерного масштабного коэффициента, согласующего физические величины, относящиеся к разным системным уровням) – это суммарный вектор магнитных дипольных моментов виртуальных частиц вакуума, присутствующих в данное мгновение в определенном объеме пространства. Совокупность виртуальных частиц характеризуется их объемной плотностью и пространственной направленностью суммарного *магнитного дипольного момента*, то есть *намагниченностью*. Очевидно, что пространственная намагниченность вакуума обязательно вторична, динамична и должна иметь локальный характер.

Однако понятие *намагниченность* вакуума до сих пор не применяется и зачастую встречает активное неприятие специалистов-физиков, хотя сходное понятие поляризация вакуума [9] (невозможное без существования его *поляризованности*) уже давно используется и возражений обычно не вызывает.

Выводы

1. Вопреки распространенным представлениям вектор статического магнитного поля \vec{B} является составным и результирующим, а первичными слагаемыми векторами являются вектор \vec{H} , выражающий действие токов проводимости, и вектор \vec{J} , выражающий действие молекулярных токов, существующих внутри магнетиков.

2. В однородных магнетиках (при первичном их намагничивании) векторы статического магнитного поля \vec{H} и \vec{B}/μ_0 имеют одинаковое направление, а направленность коллинеарного им вектора намагниченности \vec{J} определяется типом магнетика.

3. Предполагаемый автором физический смысл поля вектора \vec{B} (точнее \vec{B}/μ_0) – суммарная объемная плотность магнитных дипольных моментов, которыми обладают виртуальные частицы вакуума (поле вектора \vec{H}), а также атомы и молекулы вещественной среды (поле вектора \vec{J}). Магнитная постоянная при векторе \vec{B} играет роль размерного масштаб-

ного коэффициента, согласующего две физические величины, относящиеся к разным системным группам.

Источники информации:

1. Чуев А.С. Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними./ Журн. «Законодательная и прикладная метрология». №3 - 2007. С. 30-33.
2. Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров [Электронный ресурс] // Наука и образование: электронное научно-техническое издание.- 2012.- № 2.- Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (2.02.2012).
3. Чуев А.С. Полевые электромагнитные величины – фантом или реальность?// «Законодательная и прикладная метрология». 2012. №3. С. 71-75.
4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 4-е испр.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2003. – 320 с.
5. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 2: Электричество и магнетизм: Учеб. Пособие для втузов. – М.: «Издат. АСТ». 2004. -334 с.
6. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа. 1983. – 463 с.
7. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. – М.: «Наука». 1982. 620 с.
8. Физический вакуум. [Электронный ресурс]. // Википедия. Свободная энциклопедия. - Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Вакуум> (25.04. 2012).
9. Поляризация вакуума. [Электронный ресурс]. // Википедия. Свободная энциклопедия. - Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Поляризация_вакуума (17.04.2012).