

О трех различных интерпретациях одного и того же соотношения магнитных векторов \vec{H} , \vec{B} и \vec{J}

Рассмотрены три различных варианта интерпретации одного и того же формульного соотношения магнитных векторов \vec{B} , \vec{H} и \vec{J} . Различие вариантов состоит в том, какой из трех магнитных векторов считают составным, то есть несамостоятельным, а два других причисляют к исходным, то есть первичным. Автор настоящей работы считает составным вектор магнитной индукции. Обоснование данной точки зрения строится на критическом рассмотрении соотношений магнитных векторов между собой и с другими физическими величинами. При рассмотрении используется формальная логика. Приводятся наглядные иллюстрации соотношений магнитных величин в векторной форме как внутри, так и вне магнетиков.

В трех магнитных векторах заблудились как в трех соснах

В настоящее время в вузовских учебниках по магнетизму наиболее распространенной формой записи соотношения магнитных векторных величин (МВВ) принято следующее выражение [1, 2]:

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

По этой форме записи вектор \vec{B} , именуемый индукцией магнитного поля, считается настоящим полевым вектором; вектор \vec{J} считается материальным вектором, он именуется намагниченностью, а вектор \vec{H} , именуемый напряженностью магнитного поля, считается составным вспомогательным вектором, “не имеющим сколько-нибудь глубокого физического смысла”, “по-

скольку он является суммой двух совершенно разных физических величин \vec{B}/μ_0 и \vec{J} .” [3, стр. 184].

В работах по магнетизму встречается и другая форма записи алгебраического соотношения магнитных векторов [4, стр. 127]:

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

Данный вариант соотношения МВВ автор считает наиболее правильным и неизменно отстаивает в своих работах [5–7]. Даже с формальной точки зрения этот вариант соотношения МВВ выглядит вполне естественно – не как разность, а как сумма векторных величин. О физическом смысле составляющих выражения (2) будет сказано далее.

В работе Л. И. Антонова [8] предложен и детально рассмотрен еще один возможный вариант соотношения МВВ:

А.С. Чуев,
кандидат технических наук,
доцент кафедры “Физика”
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ключевые слова: магнетизм, магнитные векторы, магнитное поле.
Keywords: magnetism, magnetic vectors, magnetic field.

$$\vec{J} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}. \quad (3)$$

По соотношению (3) вектор намагниченности \vec{J} (вернее, поле этого вектора) является составным. Составляющая \vec{H} представляет собой потенциальную часть результирующего поля вектора намагниченности,

а составляющая $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$ представляет вихревую часть этого поля.

Для описания поля вектора намагниченности магнетика, занимающего объем V , Антонов Л.И. вводит магнитный потенциал Герца \vec{Z}_m , который определялся выражением

$$\vec{Z}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}}{r} dV.$$

Цитируем работу [8]: “Таким образом, в пространстве, где одновременно существуют поле макроскопических токов, характеризуемое вектором \vec{B}_0 (или в единицах СИ $\vec{H}_0 = (1/\mu_0)\vec{B}_0$), и поле намагниченных магнетиков, состоящее из вихревой (\vec{B}_m) и потенциальной (\vec{H}_m) частей, поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$$

всегда вихревое, а поле

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}_0 + \vec{H}_m = \vec{H}_0 + \vec{H}_m$$

(или $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_m$ в единицах СГС) – сложное.

Попытки придать полю \vec{B} или его составляющим \vec{B}_0 и \vec{B}_m , так же как полю \vec{H} или его составляющим \vec{H}_0 и \vec{H}_m иной смысл, лишены оснований и только запутывают читателя”.

Не знаю как других, но автора настоящей статьи соотношение (3) запутывает гораздо больше, чем со-

отношения (1) и (2). Единственный положительный момент, который можно усмотреть в соотношении (3) – это неявно выраженное понимание физической сущности магнитного поля как поля намагниченности, то есть пространства, содержащего магнитные диполи, каждый из которых характеризуется своим магнитным дипольным моментом.

Обратимся снова к соотношению (2). По этому соотношению вектор \vec{B} (точнее, $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$) является составным суммарным вектором, состоящим из исходных (первичных) векторов \vec{H} и \vec{J} . Эти два исходных вектора являются физически значимыми, имеют одну и ту же размерность и обладают (в отличие от полевого вектора \vec{B}) вполне ясным модельным представлением.

Намагниченность представляет собой объемную плотность векторной суммы магнитных дипольных моментов, присущих вещественным атомам и молекулам, входящих в рассматриваемый объем. Вектор \vec{H} , который совпадает по размерности с вектором \vec{J} , по мнению автора, тоже следует считать своеобразной намагниченностью свободного пространства (вакуума), что физически объяснимо наличием в нем виртуальных частиц [9, стр. 409] обязательно обладающих магнитными дипольными моментами.

По современным представлениям физический вакуум – не пустота, а некая материальная среда, в которой непрерывно возникают и исчезают (после кратковременного существования) так называемые виртуальные частицы. Образованная за счет виртуальных пар элементарных частиц поляризованность вакуума – уже давно используемое физическое понятие, но о намагниченности вакуума говорить до сих пор как-то не принято. Хотя наличие магнитного поля в свободном простран-

стве вблизи намагниченных тел – это факт, который никто не оспаривает.

Физическая значимость вектора \vec{H} и его независимость от среды хорошо известны практикам. На этот счет можно привести авторитетные высказывания и из классических работ, ставших учебниками. Например, С.Г. Калашников [10, стр. 212]: “Так как напряженность \vec{H} выражает напряженность магнитного поля только намагничивающих катушек, то очевидно, что эта напряженность будет одна и та же в вакууме и в любом магнетике”. Другой пример, А.Н. Матвеев [11, стр. 271]: “... Одинаковые токи проводимости возбуждают одинаковые напряженности магнитного поля в вакууме и в безграничном однородном магнетике...”. Аналогичные сведения о независимости поля вектора \vec{H} от свойств среды, окружающей источники магнитного поля, можно найти у И.Е. Тамма [12, стр. 339].

Практическое подтверждение независимости поля вектора \vec{H} от среды вытекает и из хорошо известной теоремы о циркуляции вектора \vec{H} . Циркуляция вектора \vec{H} по любому замкнутому контуру не зависит от среды и всегда равна сумме токов проводимости, пронизывающих этот контур.

Все сказанное не оставляет ничего другого как воспринимать

и понимать вектор $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$ в соотноше-

нии (2) (да и в других вариантах этого же соотношения) как суммарную намагниченность вещества (вектор \vec{J}) и вакуума (вектор \vec{H}). При этом отдельно взятый вектор \vec{B} в системе СИ физической значимостью, скорее всего, вовсе не обладает, поскольку модельного представления у него нет и вообразить его вряд ли представляется возможным [6, 7].

О ТРЕХ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ СООТНОШЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕКТОРОВ \vec{H} , \vec{B} И \vec{J}

В системе СГС, где размерности МВВ совпадают, вектор \vec{B} напрямую представляет собой суммарную намагниченность вакуума и вещества.

Взамен намагниченности \vec{J} в характеристике общего магнитного поля в веществе используют также относительную магнитную проницаемость среды μ , которая в виде множительного коэффициента (вариант, с участием χ – магнитной восприимчивости; $\mu = \chi + 1$) непосредственно связывает магнитную напряженность \vec{H} (то есть, первичную намагниченность вакуума) с результирующим полем $\vec{B}/\mu_0 = \mu \vec{H}$.

О чем говорит опыт

Поскольку соотношение (2) не всеми признается в качестве наиболее правильного, подкрепим наши доводы практическими примерами и наглядными изображениями полей и соотношений МВВ.

На рис. 1 изображена катушка с током, внутри которой находится ферромагнитный сердечник (вне катушки будем называть его стержень) цилиндрической формы. Внутри сердечника обязательно будет поле вектора \vec{H} от тока катушки и поле вектора \vec{J} от намагниченности вещества. Наличие внутри сердечника суммарного поля, представленного вектором \vec{B}/μ_0 можно считать, но только условно. На рисунке этот вектор изображен пунктиром, в сумме он равен двум исходным.

Если внутри катушки находился бы сердечник из другого магнитного материала, то картина соотношения МВВ соответствовала бы вариантам, изображенным на рис. 2.

Теперь рассмотрим, что произойдет при отключении тока в катушке намагничивания по рис. 1. Ферромагнитный сердечник, если он выполнен из магнитотвердого матери-

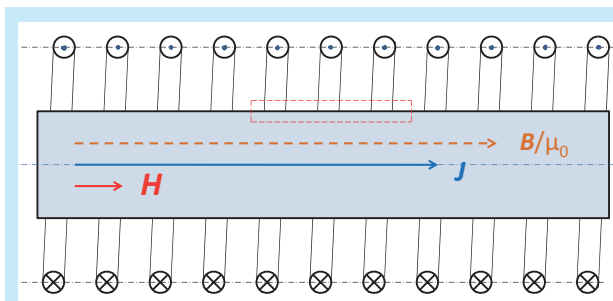


Рис. 1. Катушка с током и ферромагнитным сердечником

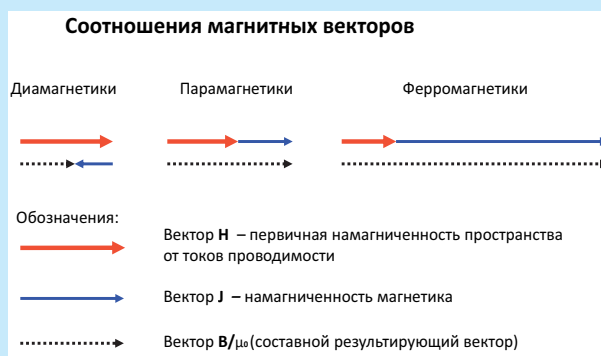


Рис. 2. Соотношения МВВ внутри различных магнетиков

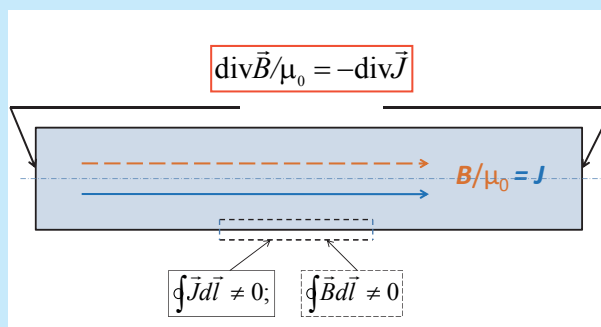


Рис. 3. Намагниченный стержень. Внешнее магнитное поле не показано

ала, останется намагниченным, поэтому поле вектора \vec{J} в нем в значительной степени сохранится. Внутри сердечника поле вектора \vec{H} исчезнет по причине отсутствия токов проводимости, а поле вектора \vec{B}/μ_0 будет представлено лишь одним фактически существующим вектором \vec{J} (рис.3).

В выделенном контуре, показанном на рис. 3, циркуляция вектора \vec{H} будет нулевой по причине отсутствия токов проводимости. Циркуляция вектора \vec{J} равна сумме поверхностных токов на боковой поверхности намагничен-

ного стержня, попадающих в этот выделенный контур, а циркуляция вектора \vec{B} обозначена лишь условно, поскольку внутри стержня $\vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ и представляет собой ту же самую намагниченность, но в ином размерностном представлении.

Все сказанное и изображенное на рис. 3 не означает отсутствия магнитного поля вне стержня, о чем говорит опыт. Магнитное поле вне намагниченного стержня целесообразно представлять вектором \vec{B}/μ_0 . Это обусловлено тем, что использование вектора веществен-

ной намагниченности \vec{J} отпадает по определению, а использование вектора \vec{H} вне стержня (что иногда делается) заставляет вводить внутрь магнетика аналогичное поле с направленностью вектора \vec{H} , прямо противоположной вектору \vec{J} . После отказа от концепции «магнитных зарядов», якобы присутствующих на полюсах магнита, последнее какого-либо физического смысла не имеет и служит лишь для обеспечения нулевого значения циркуляции вектора \vec{H} . Пример такого изображения показан на рис. 4 [13, стр. 182].

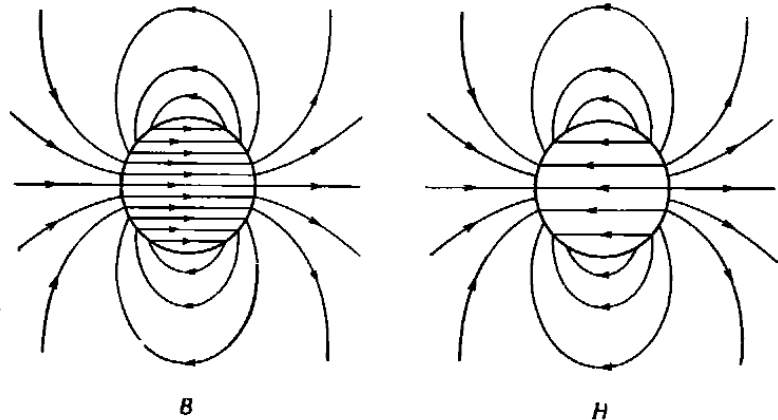
Физический смысл в описании магнитного поля постоянных магнитов обретается, если вектором \vec{H} при описании поля вообще не пользоваться, а исходить из того, что вещественная намагниченность \vec{J} (совокупность магнитных диполей) способна возбуждать в окружающем пространстве магнитное поле дипольного вида [11, стр. 265; 13, стр. 169]. Это поле качественно неотлично от поля, возбуждаемого токами проводимости и представимо в привычных единицах магнитной индукции B или \vec{B}/μ_0 .

В скалярном выражении внешнее магнитное поле каждого элементарного диполя описывается известным выражением

$$\frac{B}{\mu_0} = \frac{p_m}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \theta}.$$

Здесь p_m – магнитный момент диполя, а θ – угол между его осью симметрии и радиус-вектором \vec{r} , проведенным от центра диполя до точки наблюдения.

Внешнее магнитное поле стержневых магнитов тоже будет иметь дипольную форму (рис. 5), а суммарный магнитный момент, определяющий внешнее поле, будет зависеть от намагниченности материала, его объема и, в общем случае, от формы.



Ф и г. 5.12. Линии B и H для однородно намагниченного шара. Линии B являются замкнутыми кривыми, а линии H начинаются на поверхности шара, где расположены «магнитные заряды» — $\text{div } M$.

Рис. 4.

Традиционное, но ошибочное (по мнению автора) изображение магнитного поля намагниченного шара

Интегральное выражение для суммарного магнитного момента имеет вид

$$\vec{p}_m = \int_V \vec{J} dV.$$

О логике и здравом смысле

С точки зрения классической теории вышеизложенные рассуждения содержат очень неприятный момент. Отрицая наличие особого поля вектора \vec{B}/μ_0 внутри намагниченного стержня и его присутствие вне стержня, мы вынуждены признать переход поля намагниченности \vec{J} в поле \vec{B}/μ_0 на торцах намагниченного стержня (см. рис. 3 и рис. 5). При этом неизбежно должно выполняться соотношение

$$\text{div } \vec{B}/\mu_0 = -\text{div } \vec{J}.$$

Глядя на это соотношение, сторонники традиционного взгляда на соотношение МВВ по варианту формулы (1) не приемлют того, что ставится под сомнение четвертое уравнение Максвелла ($\text{div } \vec{B} = 0$).

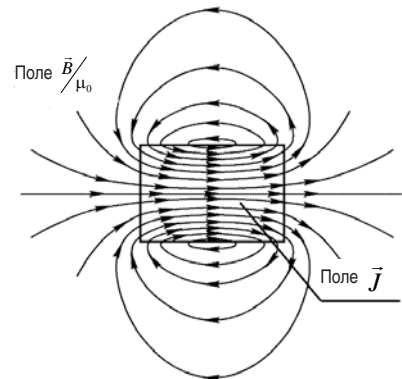


Рис. 5.

Дипольное магнитное поле намагниченного стержня.

Хотя делать фетиш из уравнений Максвелла или из самой дивергенции [14] вряд ли к лицу современной науке. Следует лишь понять,

что векторы \vec{B}/μ_0 , \vec{J} и \vec{H} имеют одно

и то же физическое содержание. Это объемная плотность магнитных дипольных моментов, принадлежащих вещественным и виртуальным частицам материи. При этом, исходя из непрерывности электрических токов, вполне допустимо принять нулевое значение дивергенции

О ТРЕХ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ СООТНОШЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕКТОРОВ \vec{H} , \vec{B} И \vec{J}

Таблица 1
Интегральные и дифференциальные соотношения
для электрических и магнитных векторных величин

Интегральные соотношения	
$\oint \vec{D} d\vec{S} = q;$	$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I;$
$\oint \vec{P} d\vec{S} = -q';$	$\oint \vec{J} d\vec{l} = \sum (I');$
$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0}(q - q')$	$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 I = \mu_0(I + I')$
Дифференциальные соотношения	
$\text{div} \vec{D} = \rho;$	$\text{rot} \vec{H} = \vec{j};$
$\text{div} \vec{P} = -\rho';$	$\text{rot} \vec{J} = \vec{j}';$
$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0}(\rho - \rho')$	$\text{rot} \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{j} = \mu_0(\vec{j} + \vec{j}')$

(в ее традиционном понимании) для вектора \vec{H} .

Наши рассуждения убедительно подтверждают соотношения МВВ с другими физическими величинами посредством интегральных и дифференциальных преобразований, которые представлены в табл. 1. Для сравнения и в качестве аналогов в табл. 1 приведены подобные соотношения и для электрического поля, где знак минус обусловлен принятой направленностью вектора поляризованно-

сти противоположной направлению электрического поля. Адекватность этих соотношений сомнений ни у кого не вызывает.

Не видеть в данных табл. 1 суммарный характер векторов \vec{E} и \vec{B} – означает отрицать свойство аддитивности интегральной и дифференциальных функций, а заодно и логику здравого смысла (формальную логику).

Авторский взгляд на соотношение электрических и магнит-

ных векторных величин опубликован в работе [15]. В 2015 году опубликована статья В. К. Скворцова [16], в которой на соотношение электрических и магнитных векторных величин высказываются взгляды, совпадающие с авторскими, но объяснение этому дается совершенно иное.

Заключение

В заключение отметим следующее. Если поле вектора \vec{H} как первичную вакуумную составляющую магнитного поля пространства, занятого вещественной средой, считать не зависящим от свойств среды, то современные представления об изменении и преломлении вектора \vec{H} на границе двух сред оказываются неверными и нуждаются в пересмотре. А это влечет за собой пересмотр еще очень многого. Данный вопрос частично освещался или затрагивался в работах автора [6, 15]. Применительно к аналогичному вектору \vec{D} электрического поля он рассмотрен в работе [17].

Литература

1. Мартинсон Л. К., Морозов А. Н., Смирнов Е. В. Электромагнитное поле. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. – 424 с.
2. Макаров А. М., Лунева Л. А., Макаров К. А. Теория и практика классической электродинамики. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 784 с.
3. Иродов И. Е. Электromagnetизм. Основные законы. Изд. 4-е испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2003. – 320 с.
4. Митрохин В. Н., Рыженко Д. С. Принцип построения композитной среды с отрицательной магнитной проницаемостью. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 1.
5. Чуев А. С. Магнитное поле – какие векторы первичны и что мы измеряем? / Журн. “Законодательная и прикладная метрология”. 2012. № 6. С. 45–48.
6. Чуев А. С. Полевые электромагнитные величины – фантом или реальность? Законодательная и прикладная метрология, 2012, № 3, с. 71–75.
7. Чуев А. С. О системном и физическом делении электромагнитных величин, относимых традиционно к группе полевых. Инженерный журнал: наука и инновации, 2014, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1295.html>
8. Антонов Л. И. Макроскопическое представление поля вектора намагниченности магнетика. УФН. 173. 11 (2003). 1241–1245. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/ufn/v173/i11/p1241> (дата обращения 06.01.2015).
9. Мартинсон Л. К., Смирнов Е. В. Квантовая физика. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. – 409 с.
10. Калашников С. Г. Электричество: Учебное пособие. 5-е изд. испр. и доп. – М., Наука. 1985. – 576 с.
11. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа. 1983. – 463 с.
12. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Учеб. пособие для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
13. Джексон Дж. Классическая электродинамика. Перевод с англ. М.: МИР. 1965. 702 с.
14. Чуев А. С. О понимании, вычислении и измерении дивергенции векторных полей физических величин. / Журн. “Законодательная и прикладная метрология”. 2013. № 2. С. 49–54.
15. Чуев А. С. Об истинных соотношениях в триадах векторов, используемых для описания электрических и магнитных полей. / Журн. ЭЛЕКТРО. № 2. 2016. Стр. 22–25.
16. Скворцов В. К. Физический смысл вектора электрического смещения и напряженности магнитного поля. Элементарный диск местной поляризации. Элементарная трубка местного намагничивания. Инженерная физика. № 9. 2015. Стр. 7–15.
17. Чуев А. С. О новых подходах в описании стационарного электрического поля внутри диэлектрических сред и на границе их раздела. Инженерный журнал: наука и инновации, 2014, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1325.html>.