

УДК 537.61; 537.612.2

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ – КАКИЕ ВЕКТОРЫ ПЕРВИЧНЫ И ЧТО МЫ ИЗМЕРЯЕМ?

А. С. Чуев.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»
Национальный исследовательский университет техники и технологий (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Россия, Москва, e-mail: chuev@mail.ru

В статье показано, что вопреки устоявшимся представлениям среди магнитных векторов первичен вектор напряженности магнитного поля, создаваемый токами проводимости, вторичным является вектор намагниченности вещественных сред. Оба названных вектора образуют, в совокупности с магнитной постоянной, вектор магнитной индукции, который является составным и вспомогательным, глубокого физического смысла он не имеет. В практических измерениях магнитного поля мы, скорее всего, имеем дело не с магнитной индукцией, а с намагниченностью.

Ключевые слова: магнитные векторы, магнитные поля, магнетики, намагниченность.

This paper shows that, contrary to established notions of the magnetic vector is primary vector of the magnetic field generated by currents of conduction, the secondary is the magnetization vector of real environments. Both are called to-vector form, together with the magnetic constant, the vector of magnetic induction, which is part and support, a profound physical meaning it does not matter. In practical measurements of the magnetic field, we probably are not dealing with the magnetic induction and the magnetization.

Key words: magnetic vectors, magnetic fields, magnetic materials, the magnetization.

В большинстве учебников по физике вектор магнитной индукции \vec{B} , наряду с вектором намагниченности \vec{J} , считается первичным, а вектор напряженности \vec{H} составным и вспомогательным, не имеющим глубокого физического смысла ([1], стр. 184). Причина этого, по мнению автора, кроется в простоте измерений магнитной индукции (применяют закон Фарадея, связывающий изменение потока магнитной индукции с получаемой при этом электродвижущей силой) и широком использовании результатов этих измерений в проверочных расчетах.

Однако, если внимательно анализировать известное соотношение для магнитных векторов

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

то оно представимо в форме сложения, что для векторов более естественно:

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

Соотношение (2) иллюстрирует нам, что поле вектора \vec{B} (точнее, \vec{B}/μ_0) не первично, а является составным. Источниками этого поля являются токи проводимости, выражаемые

Соотношение магнитных векторов

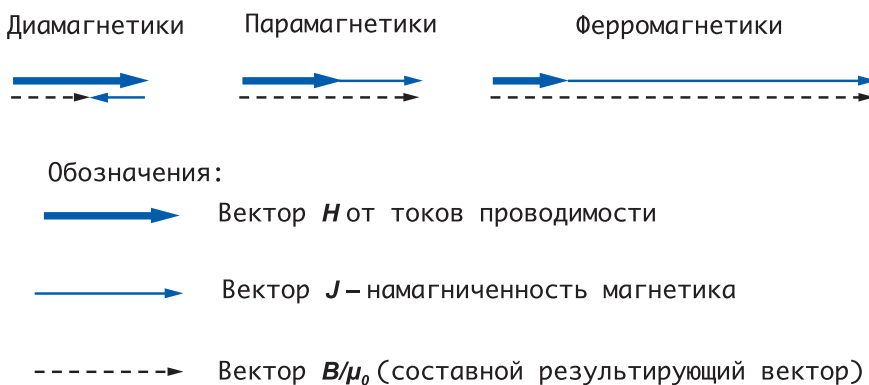


Рис. 1. Соотношения векторов: \vec{H} (утолщенный синий), $\vec{J} = \chi\vec{H}$ (тонкий синий), \vec{B}/μ_0 (пунктирный черный)

вектором \vec{H} , и молекулярные токи (магнитные моменты молекул), способные к временной или долговременной преимущественной пространственной ориентации под действием токов проводимости (вектора \vec{H}) и создающие свою составляющую магнитного поля, выражаемую вектором намагниченности \vec{J} .

Первичность вектора \vec{H} по сравнению с вектором \vec{B}/μ_0 иллюстрирует известное соотношение (3)

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (3)$$

которое иногда превратно понимают, как возможность появления вектора \vec{H} при наличии вектора \vec{B} , но это – грубейшая ошибка. Токи проводимости стационарными магнитными полями никаким образом не создаются, если нет относительного движения магнитного поля и проводника.

Вхождение в выражение (2) уже существующей намагниченности магнетиков \vec{J} или вторичной намагниченности, создаваемой под действием поля \vec{H} , вполне естественно и не требует пояснений. При сложении векторных величин соблюдается принцип суперпозиции.

Таким образом, можем констатировать – вектор \vec{B}/μ_0 вовсе не первичен. Первичными исходными векторами оказываются вектор напряженности \vec{H} и вектор намагниченности \vec{J} . Вектор напряженности \vec{H} можно понимать как первичную намагниченность пространства (вакуума) \vec{J}_0 .

Иллюстрация соотношений магнитных векторов в однородных магнетиках, первично намагничиваемых от внешнего поля с напряженностью H , приведена на рис. 1.

Рис. 1 иллюстрирует первичность вектора \vec{H} и различный отклик на него в различных магнетиках в виде вектора намагниченности \vec{J} , различного по величине и направлению. Очевидно, что вектор \vec{B}/μ_0 присутствует здесь как составной результирующий вектор, поэтому он никак не может быть первичным.

Пример с ферромагнетиком особенно нагляден. Он показывает, что результирующее магнитное поле (вектор \vec{B}/μ_0) формируется, в основном, за счет реакции магнетика. В действительности, соотношение между модулями векторов \vec{H} и \vec{B}/μ_0 для этого варианта еще большее (относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков достигает десятков тысяч единиц).

Важность правильного представления о том, какие магнитные векторы первичны, а какой вектор (один из трех) является составным, покажем на примере из учебника Иродова И. Е. [1, стр. 198].

На рис. 7.19 учебника приведено ошибочное (на наш взгляд) изображение полей \vec{B} и \vec{H} создаваемых токовым проводником, лежащим в плоскости, отделяющей пространство, заполненное непроводящим магнетиком с проницаемостью μ , от вакуума. Данное изображение приведено на рис. 2.

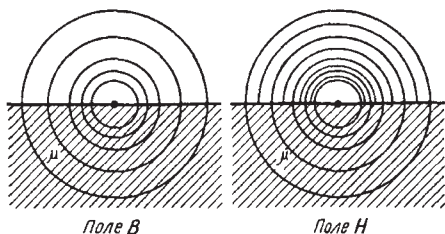


Рис. 2. Изображения (по Иродову) полей \vec{B} и \vec{H} от проводника с током

На рис. 2 поле вектора \vec{B} показано одинаковым как внутри магнетика, так и в вакууме, а результирующее (по Иродову) поле \vec{H} внутри магнетика

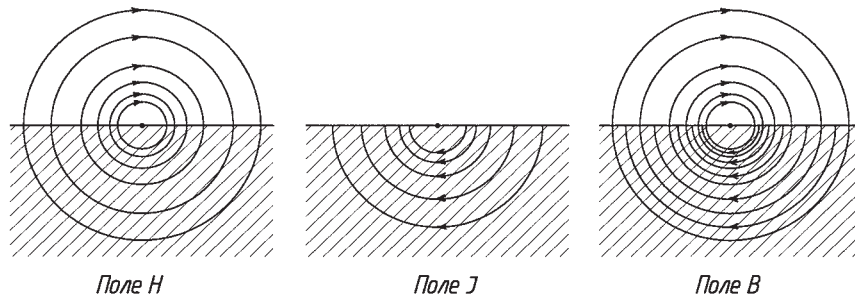


Рис. 3. Магнитные поля от проводника с током на границе вакуум-парамагнетик и вакуум-ферромагнетик

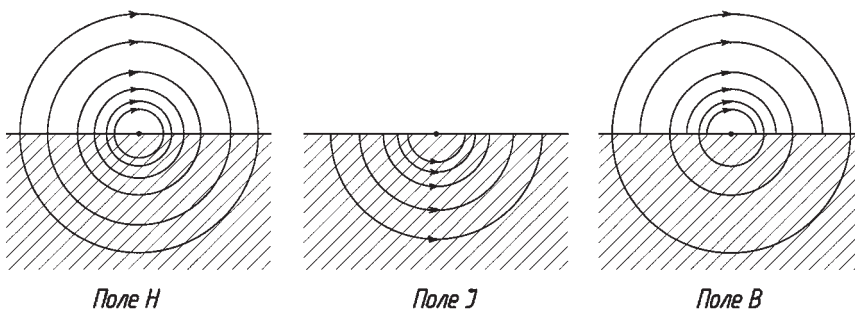


Рис. 4. Магнитные поля от проводника с током на границе вакуум-диамагнетик

показано ослабленным, при этом тип магнетика не указан.

Ошибочность или некорректность изображений по рис. 2 состоит в том, что здесь не учитывается то, что в данном примере векторы на границе двух сред имеют только нормальную составляющую, и реальные среды не могут быть бесконечно большими. На достаточном удалении от проводника с током поле \vec{B} обязательно будет различным в вакууме и в магнетике по закону Био-Савара-Лапласа, который учитывает наличие в магнетике относительной магнитной проницаемости $\mu \neq 1$. Поэтому в магнетике поле \vec{B} обязательно будет усиленным или ослабленным, а потому оно неизбежно оказывается и составным – как сумма двух исходных полей.

С учетом соотношений (2), (3) и рис. 1 данный пример, по мнению автора, должен иметь следующие иллюстрации, приводимые для большей ясности отдельно для разных типов магнетиков (рис. 3 и рис. 4).

Основные аспекты рис. 3 и 4 следующие: в диамагнетике поле \vec{J} направлено против первичного токового поля \vec{H} , ослабляя его, а в парамагнетиках и ферромагнетиках поле \vec{J} совпадает по направлению с первичным полем \vec{H} , усиливая его. Таким образом, составным и деформированным на границе раздела двух сред оказывается результирующее поле \vec{B} , при этом соблюдается методологически верный принцип суперпозиции.

Можно предвидеть возможное 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 \vec{B} (при отсутствии тангенциальной составляющей) не будет равной 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 (локальном равенстве) нормальных составляющих вектора \mathbf{B} по обе границы раздела двух сред. В принципе, эта фраза верная, плавный переход из одного состояния в другое относится к непрерывности.

Представим себе железный стержневой магнетик, расположенный вдоль магнитных силовых линий внешнего намагничивающего поля. В этом поле стержень естественно намагнитится, поле \vec{B}/μ_0 у торцов намагниченного стержня будет равно его внутренней намагниченности \mathbf{J} , а по мере удаления от торцов стержня магнитное поле (намагниченность пространства) будет обязательно убывать. Расчет намагниченности «пустого» пространства в дальней зоне от намагниченного стержня обычно не ведут, а измеряют значение вектора магнитной индукции \mathbf{B} , хотя их взаимосвязь для вакуума простейшая (через магнитную постоянную).

До сих пор сохраняющаяся практика использования поля \mathbf{B} обусловлена, по мнению автора, лишь привычкой и тем, что в системе СИ индукция магнитного поля легко измерима (используется закон Фарадея) и непосредственно связана с измеряемой электродвижущей силой. В то же самое время о намагниченности не вспоминают, но это никак не может и не должно быть оправданием искажения физики магнитных полей.

В подтверждение правильности наших изображений магнитных полей на рис. 3 и рис. 4 (с равномерным полем \mathbf{H} и неравномерным полем \mathbf{B}) сошлемся на авторитетные источники. В книге Ландау Л. Д. и Лифшица Е. М. «Теоретическая физика», том 8 [2, стр.162] прямо сказано: «...наличие среды приводит лишь к изменению магнитной индукции в μ раз; напряженность же $\vec{H} = \vec{B}/\mu$ (примеч. используется размерностная система Гаусса) вообще не изменится». Там же

на стр. 154 говорится, что среднюю напряженность макроскопического магнитного поля принято называть магнитной индукцией. В книге Френкеля Я. И. [3, стр.19] пишется: «...среднюю (макроскопическую) напряженность магнитного поля \mathbf{H} обычно называют «магнитной индукцией» и обозначают через \mathbf{B} ;...».

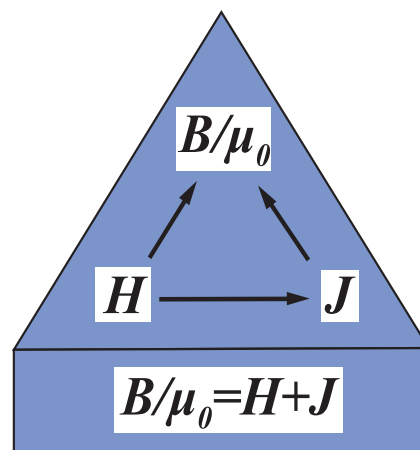
Из приведенных представлений, сформулированных авторами книг в системе Гаусса, легко сделать вывод о том, какая физическая величина первична.

Дополнительно можно привести фразу из учебника Матвеева А. Н. [4, стр.271], написанного уже с использованием системы СИ, «...одинаковые токи проводимости возбуждают одинаковые напряженности магнитного поля в вакууме и в однородном безграничном магнетике...».

Противники излагаемой здесь точки зрения на соотношения магнитных векторов приводят в качестве возражения следующий довод: авторы известных учебников правы, поскольку они ведут речь о безграничных изотропных магнетиках. Когда же появляется граница двух сред, то эти высказывания оказываются не верными. Но допуская такое (равенство значений \mathbf{B} в двух магнетиках), мы приходим к нелепому (если следовать существующей теории) равенству $\mu_1 H_1 = \mu_2 H_2$, согласно которому магнетик с большей относительной магнитной проницаемостью приписывается меньшее значение напряженности магнитного поля. Данная нелепость как раз и запечатлена на рис. 2, в вакууме линии поля \mathbf{H} показаны более частыми.

На рис. 5 изображена защищаемая здесь архитектура магнитных векторных величин, характерная, во всяком случае, для статических магнитных полей. В основание пирамиды положены векторы \mathbf{H} и \mathbf{J} , а вектор индукции магнитного поля является вторичным составным из первых двух.

Представление полевого вектора \vec{B} , как суммы двух первичных неполе-



$$\vec{B}/\mu_0 = (1+\chi)\vec{H} = \mu\vec{H} \quad \vec{J} = \chi\vec{H} \quad (1+\chi) = \mu$$

Рис. 5. Архитектура магнитных векторных величин

вых (можно сказать «материальных» [5]) векторов \vec{H} и \vec{J} , умножаемых на магнитную постоянную μ_0 , которая системно относится к структуро-средовым электромагнитным величинам [5], ставит под вопрос вообще объективность существования поля \mathbf{B} как такового [6] или, по крайней мере, показывает возможность описания магнитного поля без использования этой физической величины.

Возвращаемся к вопросу об измерениях. Если поле \mathbf{B} не существует, то что же мы тогда измеряем? По мнению автора измеряем мы все-таки намагниченность \mathbf{J} , связанную в системе СИ с полевой величиной – индукцией магнитного поля \mathbf{B} через магнитную постоянную μ_0 , представляющую собой (физически) магнитную проницаемость вакуума:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{J}_0, \tag{4}$$

где: \vec{J}_0 – намагниченность вакуума.

Магнитный поток Φ и электродвижущая сила \mathcal{E} , характеризующие величину магнитной индукции \mathbf{B} , при неизменном значении площади S измерительной рамки или петли, будут связаны с намагниченностью вакуума J_0 выражениями:

$$\Phi = BS = \mu_0 J_0 S, \tag{5}$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\mu_0 S \frac{\partial J_0}{\partial t}. \tag{6}$$

Из этих выражений видно, что при измерении электродвижущей

силы, возникающей при изменении магнитных параметров, мы, по сути, измеряем изменение намагниченности вакуума. Интересно, что в кинематической системе

ВЫВОДЫ

1. В создании магнитного поля первичны токи проводимости, образующие поле вектора напряженности \vec{H} , и молекулярные токи, образующие поле вектора намагниченности вещественных сред \vec{J} . Поле

размерностей, которую автор (в своей интерпретации) считает наиболее истинной и применяет ее в качестве базовой для системы ФВиЗ [5, 7], размерности магнит-

ного потока и намагниченности идентичны, а магнитная постоянная и площадь по размерности являются обратными друг другу величинами.

вектора \vec{B} , точнее отношения \vec{B}/μ_0 является составным и результирующим первых двух и самостоятельного физического смысла не имеет.

2. При измерении магнитной индукции и магнитного потока,

а также их изменений, мы, по сути, имеем дело с физической величиной намагниченность, которая системно относится не к полевым, а к базовым электромагнитным величинам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов И. Е. *Электромагнетизм. Основные законы.* – Изд. 4-е испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2003. – 320 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред.* – М.: «Наука». – 1982. – 620 с.
3. Френкель Я. И. *Электродинамика. Том 2. Макроскопическая электродинамика твердых тел.* –

Л-М: ОНТИ. – 1935. – 557 с.
4. Матвеев А. Н. *Электричество и магнетизм.* – Учеб. пособие. – М.: Высш. школа. – 1983. – 463 с.
5. Чуев А. С. *Системный подход в физическом образовании инженеров.* // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. *Электрон. журн.* – 2012. – № 2. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (дата обращения: 2.02.2012).

6. Чуев А. С. *Полевые электромагнитные величины – фантом или реальность?* // «Законодательная и прикладная метрология». – 2012. – № 3. – С. 71–75.
7. Чуев А. С. *Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними.* // Законодательная и прикладная метрология. – 2007. – № 3. – С. 30–33.

Дата принятия 05.08.2012



НОВОСТИ МЕТРОЛОГИИ

КОМПАНИЯ BRUKER

объявила о создании атомно-силового микроскопа (АСМ) FastScan Bio, который позволяет осуществлять микроскопию высокого разрешения биологических исследований в динамике.

Прорыв инноваций в конструкции системы FastScan Bio привел к быстрому сканированию, позволяющему проводить измерения в физиологических условиях эксплуатации в жидкости, превышая пределы дифракции оптической микроскопии. В системе использован новый пользовательский интерфейс, что упрощает его использование и повышает производительность работы биологов.

FastScan Bio – это первый АСМ, который может предоставить временное разрешение в кадрах в секунду для живых наблюдений биологических образцов. Теперь передовые научные исследования белков, ДНК, РНК, мембран, клеточного и тканевого взаимодействия обеспечиваются более простыми возможностями.

Это открывает двери для каждой биологической лаборатории для наблюдения механизмов биологических сред в динамике выполнения ими биологических функций при пространственном разрешении атомно-силового микроскопа FastScan Bio

<http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-news/atomic-force-microscope-biological-dynamics.html>