УДК 537

Электростатические и постоянные магнитные поля в среде

П. И. Ивашкин[1,2]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

[2]Российский Национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова

При изложении учебного материала (УМ) по данному разделу авторы учебников в основном используют силовые характеристики полей - напряженность **E** и индукцию **B.** При этом часто встречаются заявления, что **D** и **H** не имеют физического смысла, являются «вспомогательными» векторами и т. д. Для полного описания электрических полей необходимы именно обе величины - и напряженность, и индукция. У каждой из них своя роль, которая, в частности, отражена в уравнениях Максвелла. В учебнике [1] величины **E** и **B** совершенно правильно названы *силовыми,* а **D** и **H** – *количественными.* Если вместо *количественные* назвать **D** и **H** *расчетными* характеристиками, то это название будет отражать смысл предлагаемой логики изложения. Обычно логика изложения в учебниках такова: начинают с «имеющей физический смысл» величины **E.** Далее вводится вектор поляризации **P** как функция **E.** Но величина **E** сама зависит от поляризации диэлектрика. В [2] после изложения теоремы Гаусса для **E** в среде говорится: «Однако эта формула неприемлема для описания поля **E** в диэлектрике, т. к. она выражает свойства неизвестного поля **E** через связанные заряды, которые, в свою очередь, определяются им же. Это еще раз доказывает целесообразность введения вектора электрического смещения». «Новый» вектор **D** вводится как комбинация **P** и **E.** Воспринять смысл введенной таким образом величины **D** трудно. Достаточно попробовать приложить эти знания к самым простым конфигурациям – плоскому конденсатору или полю в диэлектрике у поверхности заряженного проводника. Уместно привести мнение, изложенное в [3]: «Чтобы охарактеризовать интегральные свойства поля, вводят понятие поток напряженности, ..это не имеет физического смысла, поскольку E характеризует силу, и интегрирование этой величины допустимо только вдоль линейного пути. Интегрирование по поверхности допустимо только для плотности потока, т. е. отсюда вытекает бессмысленность применения для поля напряженности теоремы Гаусса в интегральной и дифференциальной формах». Кроме того, при использовании напряженности **E** возникают известные трудности – линии **E** терпят разрыв на границе двух диэлектриков и т. д. Здесь следует сказать, что соотношение $\oint_S Dds = q$ справедливо во всех без исключения случаях. Обратимся к мнению специалистов: «при расчете электростатических полей широко используется вектор **D**» [4], «нас будет интересовать главным образом использование вектора **D** для расчета электростатического поля в неоднородной среде, поскольку непосредственное вычисление вектора **E** в этом случае встречает большие трудности» [4], «поверхности раздела диэлектриков, не содержащие свободных зарядов, являются особыми для **E,** но не являются особыми для вектора **D**» [4]. Следует отметить, что в некоторых задачах, наоборот, удобнее использовать при расчетах величину **E**.

Изложение целесообразно начинать с рассмотрения величин **D** и **H.** При этом ввести вектор **D** таким образом, как он введен Максвеллом: div **D** =**ρ** или $\oint_S Dds = q$.Таким образом, проясняется физическое содержание величины **D**: индукцию **D** можно рассматривать как исходящее от заряда «возбуждение» [1]. Кроме легкой «воспринимаемости», достоинством является и соответствие другому дидактическому принципу: *движение от простого к сложному*». Вначале рассматривается поле, создаваемое точечным зарядом в вакууме. В соответствии с теоремой Гаусса, значение плотности потока **D** на расстоянии R от заряда равно частному от деления величины заряда на площадь сферы с радиусом R. Т. о. мы получаем представление о физическом содержании величины, описываемой вектором **D.** Отметим, что большую роль в восприятии смыслов величины **D** играет ее размерность – *Кл/м*^{2}. Она совпадает с размерностью поляризованности, т. е. это однородные величины. Далее, величина **E** в вакууме находится делением **D** на размерную величину ε_0: $\mathbf{E} = \mathbf{D}/\varepsilon_0$.

Следующий этап – изучение полей в среде. И этот материал воспринимается легко при использовании величины **D** в качестве исходной. Для выявления физической связи изучаемых понятий сначала рассматривается простейшая конфигурация: плоский конденсатор с плотностью заряда на обкладках σ. Что происходит при внесении диэлектрика? Электрическое поле**,** созданное зарядами на обкладках конденсатора, вызывает поляризацию диэлектрика, что при макроописании эквивалентно возникновению на поверхностях диэлектрика заряженных плоскостей с плотностью σ' , создающих в объеме диэлектрика «противополе», что приводит к уменьшению поля **E** по сравнению с вакуумом в $\frac{\sigma}{\sigma-\sigma'}$ раз.

В КОФ обычно рассматривается случай, когда поля малы и медленно изменяются в пространстве и времени. В этом случае принимают, что в однородном изотропном диэлектрике вектор **P** пропорционален **E.** Т.к. величина **D** в этом случае пропорциональна **E**, то и величина **P** будет пропорциональна **D**, и, следовательно, пропорциональна σ. А так как численное значение **P** равно поверхностной плотности поляризационных зарядов (ППЗ) σ', то получим, что σ пропорциональна σ', т. е. мы можем записать: $\sigma' = k\sigma$, где k - характеристика диэлектрика $\left(k = \dfrac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right)$. Введенная таким образом величина k прямо связывает величину *ППЗ* σ' с плотностью зарядов σ на поверхности заряженного проводника, т. е. устанавливает зависимость **P** и **D**. Это отмечается и в литературе: «Мы уже неоднократно отмечали, что поле связанных зарядов пропорционально полю свободных» [5]. Использование коэффициента k упрощает решение многих задач, позволяя обойтись без использования вектора поляризации **P**. Например, напряженность электрического поля **E** в однородном диэлектрике, заполняющем все пространство, находится умножением поля, создаваемого данными сторонними зарядами в вакууме, на величину $(1 - k)$. В случае неоднородной среды поле вектора **D** также во многих случаях совпадает с полем в вакууме, создаваемым данными сторонними зарядами. Это, например, часто встречающийся случай совпадения границ раздела слоев с эквипотенциальными поверхностями, сферически симметричные конфигурации, многослойные плоские и сферические конденсаторы. В этом случае использование **D** позволяет легко найти поле **E:** значение **E**, рассчитанное для вакуума, умножаем на $(1 - k)$.

Конечно, в общем случае неоднородного диэлектрика распределение зарядов по поверхности проводников, и, следовательно, конфигурация поля **D,** может измениться. Но это не меняет общего характера связи **P** и **D** в любой точке диэлектрика.

Рассмотрим смыслы различных выражений, связывающих **D, E** и **P.** Обычно используется выражение:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} \qquad (1)$$

Интересно утверждение в [3]: «Недопустимо...определение полной индукции в диэлектрической среде как суммы совершенно различных величин: напряженности поля и поляризации единицы объема среды».. Так как **D** и **P** **–**однородные величины, то есть смысл наоборот, напряженность электрического поля **E** выразить через **D** и вектор **P**, т. е. записать (1) в виде: $\mathbf{E} = \dfrac{\mathbf{D}-\mathbf{P}}{\boldsymbol{\varepsilon\varepsilon}_0}$ (2)

Коль скоро (1) правильно описывает связь физических величин, то и соотношение (2) будет справедливым, т. к. мы просто переписали (1) в другой, математически эквивалентной, форме.

Сравним с характером связи между векторами **B** и **H,** обычно имеющей вид:

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} + \mathbf{M}, \qquad (3)$$

Соответствующий, например, определению в [6]: «среднее значение магнитной индукции ...складывается из индукции, созданной намагничивающей катушкой и индукции, созданной поверхностными токами магнетика». В [7] дается похожее определение: «магнетик дает добавочную напряженность магнитного поля, которая складывается с первоначальной напряженностью магнитного поля, вызванного текущими по проводам токами. Векторную сумму этих напряженностей…, по причинам исторического характера, называют вектором магнитной индукции…». Т. о., логика связи аналогична (2), а не (1).

Какая же форма записи имеет больший смысл? Смысл (2) прост - это разность напряженности поля **E =D/ε_0,** созданной свободными зарядами, и напряженности поля **P/ ε_0**, вызванной поляризацией диэлектрика («противополя»).

С дидактической точки зрения [8] схема изложения, в которой **D** рассматривается как исходная величина (пусть даже в качестве расчетной) предпочтительнее ввиду простоты. Вектор индукции **D** имеет также следующие особенности: легко воспринимается физическое содержание (выраженное в уравнениях Максвелла), одинаковая физическая размерность с поляризованностью диэлектрика и, во многих случаях, облегчение при расчете «силовой» характеристики **E**.

При изучении УМ по магнитному полю (МП) использование напряженности **H** в качестве исходной величины также облегчает восприятие УМ. Сначала рассматривается напряженность **H** на расстоянии R от прямолинейного бесконечно длинного проводника с током I: /**H**/=I/2πR. Введя ***циркуляцию*** вектора **H,** мы одновременно с раскрытием физического содержания величины, описываемой вектором **H,** приближаемся к пониманию уравнений Максвелла. Размерность **H** – *А/м,* также облегчает восприятие физического содержания данной величины. Использование вектора **H** полезно и при наличии магнетиков. Например, при одинаковых токах проводимости напряженность магнитного поля в однородном безграничном магнетике такая же, как и в вакууме. Использование теоремы о циркуляции **H** позволяет простым образом рассчитать МП в тороиде. Для расчета поля в соленоиде представляем его как участок тороида. Получаем, что величина напряженности **H** в длинном соленоиде равна произведению силы тока на число витков, приходящихся на единицу длины катушки. Отсюда следует, что величина поля **H** в длинном цилиндре, обтекаемом поверхностным током, равна поверхностной плотности этого тока. Т. о. поясняется влияние магнетика на величину поля в соленоиде: в результате сложения молекулярных токов, возникающих в объеме магнетика при намагничивании, возникают поверхностные токи. Эти токи можно рассматривать как дополнительные *ампер-витки,* складывающиеся с *ампер-витками* намагничивающей катушки.

Физический смысл величин **H** и **B**, как микроскопический, так и макроскопический, подробно рассмотрен в статье [9]. В ней предлагается принять **H** в качестве основной величины, характеризующей магнитное поле.

Таким образом, при использовании в изложении величин **D** и **H** облегчается усвоение УМ и решение задач.

Литература

1. *Зоммерфельд А.* Электродинамика. - М., 1958.

2. *Трофимова Т. И.* Курс физики. - М., 2001.

3. *Нестеренко А. Д.* Введение в теоретическую электротехнику. - Киев, 1969.

4. *Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н.* Методы расчета электростатических полей. - М., 1963.

5. *Зильберман Г.Е.* Электричество и магнетизм. - Долгопрудный, 2008.

6. *Калашников С.Г.* Электричество. - М., 1985.

7. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* - Курс общей физики Т. 2 Электрические и электромагнитные явления. - М.-Л., 1961.

8. *Ивашкина В.П., Ивашкин П.И.* Электростатические и постоянные магнитные поля в среде // Сб. трудов 9-й региональной научно-практической конференции. Т. 1, 24 апреля 2008г. М., 2009. - С. 178-190.

9. *Захаров В.А.* Об определении понятий в области магнитных явлений // Физическое образование в вузах, т. 13, № 1, 2007.