

О новых подходах в описании стационарного электрического поля внутри диэлектрических сред и на границе их раздела

© А.С. Чуев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проанализированы известные изображения стационарного электрического поля внутри диэлектрических сред и на границе их раздела, отмечена парадоксальность этих изображений в представлении различными векторами: электрической напряженности и электрической индукции. Предложены иные варианты изображения полей, которые лишены указанных парадоксов. Однако эти варианты требуют пересмотра устоявшихся представлений, в частности представлений о преломлении линий вектора электрической индукции на границе двух сред и усилении электрической индукции внутри диэлектрика. Предложена новая модель, объясняющая поведение электрических векторов на границе двух сред.

Ключевые слова: *электрическое поле, электрические векторы, диэлектрики, принцип суперпозиции.*

«Мы должны найти такой прием исследования, при котором мы могли бы сопровождать каждый свой шаг ясным физическим изображением явления».

Д.К. Максвелл

Отправной точкой настоящего исследования стало парадоксальное изображение стационарных электростатических полей E и D в известном учебнике И.Е. Иродова по электромагнетизму [1, с. 95]. Указанное изображение полей, которые формируются от одиночного электрического заряда q , расположенного на границе двух сред, представлено на рис. 1.

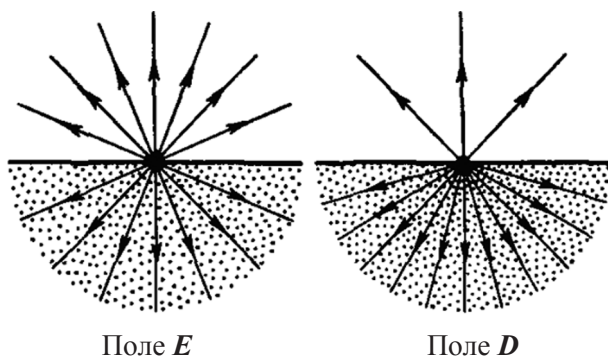


Рис. 1. Изображение [1] стационарных полей E и D от электрического заряда, расположенного на границе вакуум – диэлектрик

Парадоксальность изображения полей на рис. 1 состоит в том, что электрическое поле \mathbf{E} показано не зависящим от среды, а поле \mathbf{D} , наоборот, – зависящим от среды, а именно, ослабленным в вакууме и более сильным внутри диэлектрика. Ошибочность такого изображения полей (см. рис. 1) подтверждают следующие известные соотношения:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{q}{4\pi r^2} \vec{e}_r; \quad \mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E} = \frac{q}{4\pi r^2} \vec{e}_r. \quad (1)$$

Согласно соотношениям (1), на одинаковых и симметрично расположенных относительно поверхности раздела двух сред точках значения \mathbf{E} будут разными, а значения \mathbf{D} – одинаковыми. Поэтому симметричным обязано быть изображение для поля \mathbf{D} , а не для поля \mathbf{E} , как это показано на рис. 1.

В ранее опубликованных работах автора [2–4] показано, что с системных позиций векторы \mathbf{D} и \mathbf{P} принадлежат к одной группе базовых электромагнитных величин. Векторы \mathbf{D} и \mathbf{P} имеют свое модельное представление в виде *объемной плотности суммарного электрического дипольного момента*, а вектор \mathbf{E} отдельного модельного представления не имеет. Возможно, он не имеет и своего глубокого физического смысла.

Более правильное, по представлению автора, изображение полей \mathbf{D} , \mathbf{P} и \mathbf{E} для той же задачи приведено на рис. 2. Кроме смены характера изображения полей \mathbf{E} и \mathbf{D} , на рис. 2 показана еще одна особенность: здесь поле вектора *поляризованности* диэлектрика $\mathbf{P}' = -\mathbf{P}$ направлено против внешнего поля \mathbf{D} , что более правильно с физической точки зрения. Ослабляющее поле обязано быть направленным в противоположном направлении относительно ослабляемого поля. Совместное действие (суперпозиция) полей \mathbf{D} и \mathbf{P}' образует результирующее поле вектора \mathbf{E} , значения которого для согласования размерностей умножаются на электрическую постоянную ε_0 . Поскольку внешнее поле внутри диэлектрика ослабляется не полностью, то результирующее поле $\varepsilon_0 \mathbf{E}$ всегда должно иметь направление, совпадающее с вектором \mathbf{D} .

Если признать поле \mathbf{D} не зависящим от свойств диэлектрической среды, т. е. не изменяющимся при переходах из одной среды в другую, то придется признать ошибочность известных изображений поля \mathbf{D} со сгущениями линий поля внутри шарообразного диэлектрика (рис. 3). Данное изображение встречается в книгах и учебниках по электромагнетизму со времен Зоммерфельда [5] и до наших дней [6]. Однако веществ, обладающих свойством усиления внешнего электрического поля, в природе до сих пор не обнаружено.

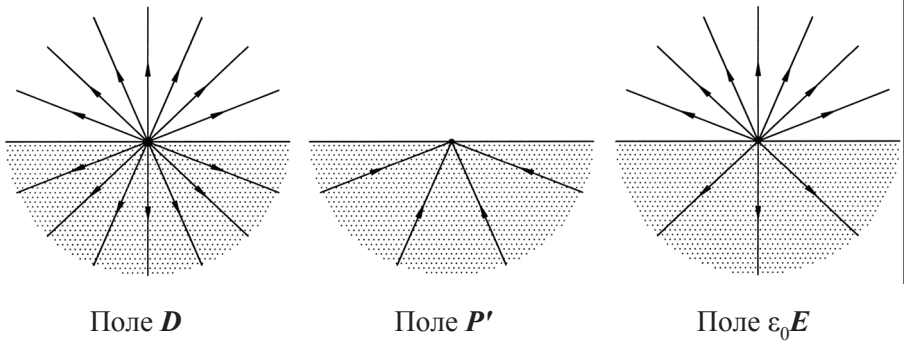


Рис. 2. Предлагаемое изображение полей электрических векторов D , P' и E от заряда, расположенного на границе двух сред

Отвергая возможность усиления поля D внутри диэлектриков, неизбежно придется признать ошибкой и заблуждением широко распространенные представления о преломлении вектора D на границе диэлектрических сред.

Поясним сказанное подробнее. Картина на рис. 3 примечательна еще и тем, что линии D также невозможно изобразить и более разреженными внутри диэлектрика, поскольку тогда придется их показывать более густыми вне шара (видимо, вблизи поверхности диэлектрического шара) или же линии D придется замыкать на связанные заряды. То и другое неприемлемо.

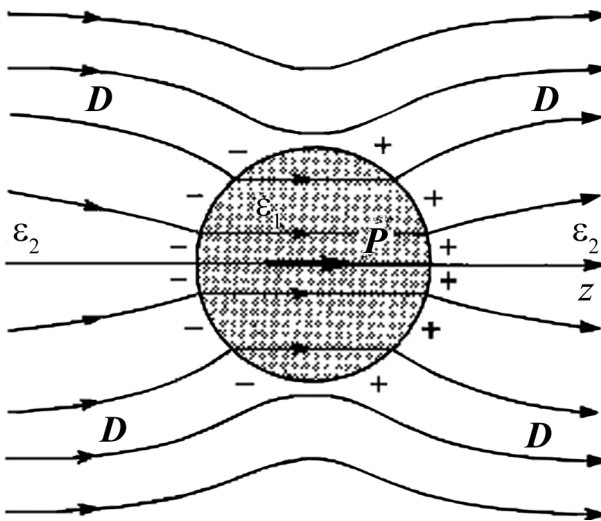


Рис. 3. Изображение диэлектрического шара в роли «ферроэлектрика», способного стягивать и уплотнять силовые линии внешнего однородного поля

Таким образом, единственно подходящим и логически непротиворечивым вариантом остается признать линии поля вектора \mathbf{D} вблизи и на границе перехода от одной диэлектрической среды к другой, *не испытывающими деформаций и преломлений*. В этом случае результирующую картину электрического поля следует представлять в виде суперпозиции внешнего поля и собственного поля диэлектрического шара.

Изображение электрического поля \mathbf{E} внутри и в окрестности диэлектрического шара приведено на рис. 4. Внешнее электрическое поле взято для простоты однородным, результирующее поле вблизи шара таковым не является. Данное изображение поля \mathbf{E} (см. рис. 4) признается всеми и разногласий не вызывает.

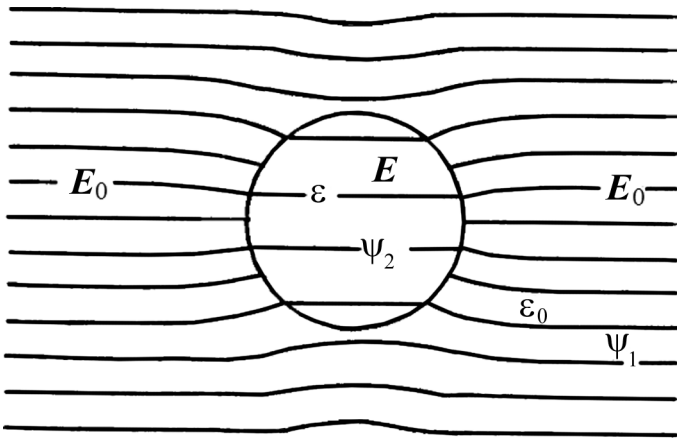


Рис. 4. Изображение электрического поля \mathbf{E} для диэлектрического шара

Разногласия возникают в объяснении получения такой картины. Традиционный подход исходит из обязательного совпадения линий полей \mathbf{E} и \mathbf{D} , а также их направленности. Предлагаемый подход исходит из принципа суперпозиции, согласно которому образование картинки, приведенной на рис. 4, представляется следующим образом. Есть первичное однородное поле \mathbf{D} . Оно вызывает поляризацию шара, поле которого имеет дипольный характер [7]. Суперпозиция двух полей и образует результирующее поле, показанное на рис. 4.

Наглядная иллюстрация суперпозиции двух обозначенных составляющих приведена на рис. 5. Однородное поле образовано в пространстве между плоскими пластинами заряженного конденсатора (оно изображено штриховыми линиями). Собственное поле поляризованного диэлектрического шара показано сплошными линиями: это поле ди-

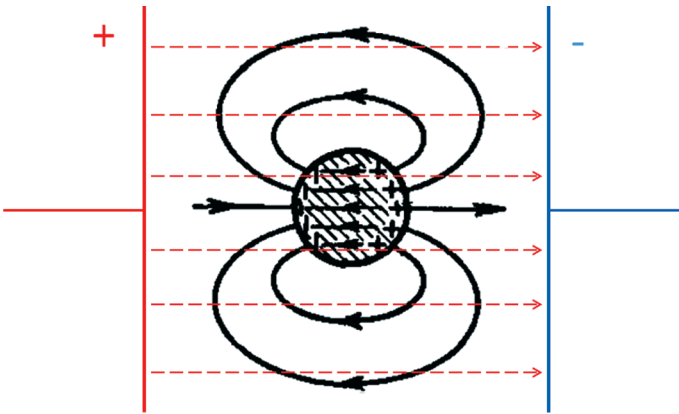


Рис. 5. Две суперпозиционные составляющие, формирующие линии электрического поля, которое изображено на рис. 4

польное, оно похоже на соленоидальное магнитное поле, создаваемое магнитными диполями.

В тех местах, где векторные линии двух полей совпадают по направлению, отмечается усиление результирующего поля. Там, где линии полей противоположны друг другу, происходит ослабление поля. При расположении линий двух полей под углом друг к другу образуется искривление линий суммарного поля (см. рис. 4).

Поскольку приводимый ранее материал имеет в основном иллюстративный характер, то вполне уместным будет привести дополнительные пояснения с привлечением формульных обозначений и соотношений рассматриваемых величин.

В электростатике общепринято и повсеместно используется следующее соотношение электрических векторных величин:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2)$$

где \mathbf{D} – индукция электрического поля; ϵ_0 – электрическая постоянная, именованная ранее диэлектрической проницаемостью вакуума; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; \mathbf{P} – поляризованность диэлектрической среды.

Обычно электрические векторы \mathbf{E} , \mathbf{D} и \mathbf{P} внутри изотропных диэлектрических сред изображают одинаково направленными, причем вектор \mathbf{D} трактуют как суммарный и вспомогательный, «не имеющий глубокого физического смысла» [1]. Наглядные соотношения электрических векторов в традиционном представлении и в предлагаемом варианте, обсуждаемом далее, приведены на рис. 6.

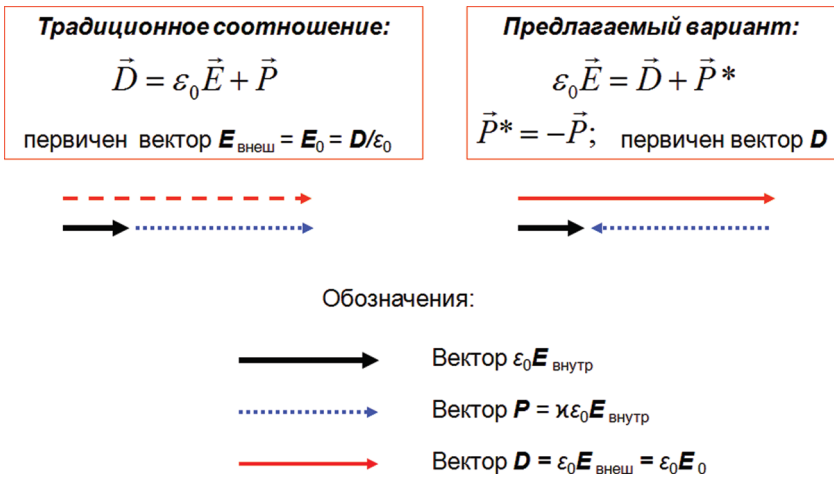


Рис. 6. Традиционное изображение и предлагаемый вариант соотношения электрических векторов внутри диэлектрика

В традиционном представлении электрические векторы \mathbf{P} и \mathbf{E} изображают совпадающими по направлению, а вектор \mathbf{D} совместно с другими векторами вообще стараются не показывать. В то же время известно, что в диэлектриках внешнее электрическое поле ослабляется за счет поляризации диэлектрика и вектор \mathbf{P} должен бы изображаться направленным в противоположную сторону относительно внешнего и внутреннего (для диэлектрика) электрического поля.

Поскольку вектор \mathbf{D} традиционно считается составным и вспомогательным, то на традиционном соотношении (см. рис. 6) он изображен пунктирной линией, а его составляющие $\epsilon_0 \mathbf{E}$ и \mathbf{P} показаны в общепринятом исполнении, т. е. одинаково направленными. В обозначениях на рис. 6 составляющая $\epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$ соответствует составляющей $\epsilon_0 \mathbf{E}$ в соотношении (2), оно выражает электрическое поле внутри диэлектрика.

Составляющая $\epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ характеризует внутреннее поле в диэлектрике, сохранившееся от внешнего электрического поля $\epsilon_0 \mathbf{E}_0$, ослабленного за счет *поляризованности* \mathbf{P} диэлектрика. При этом естественно возникает вопрос о том, что логичнее связывать вектор \mathbf{P} не с внутренним ослабленным полем диэлектрика $\epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$, а с первичным внешним полем $\epsilon_0 \mathbf{E}_0$. Этот аспект рассматриваемой проблемы подробно исследован в работе [8].

Традиционно принято изображать все три электрических вектора внутри диэлектрика одинаково направленными. Более того, первичный вектор $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внеш}} = \epsilon_0 \mathbf{E}_0$ зачастую вообще не показывают. Пример такого изображения приведен на рис. 7 [9]. Как видим, здесь сильно затемняется (а то и вовсе теряется) информация о величине внешнего поля, представляемого суммарным вектором в той и другой средах.

Хотя на рис. 7 достаточно хорошо видно, что сумма двух векторов ($\mathbf{E}_{in} + \mathbf{P}_{in} = \text{const}$ векторы представлены в СГС) с той и другой стороны от границы двух сред остается неизменной.

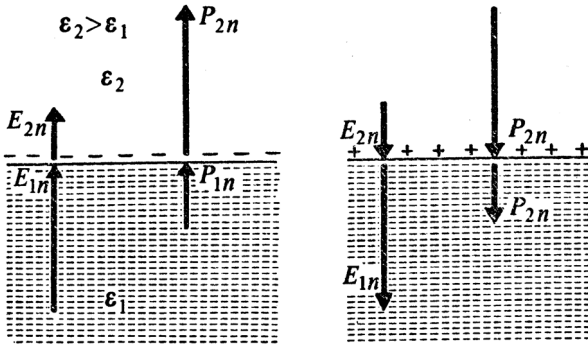


Рис. 7. Изображение электрических векторов в учебнике А.Н. Матвеева

Из всего изложенного следует вывод, что изображать вектор \mathbf{P} и внутреннее электрическое поле диэлектрика $\epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$ одинаково направленными неправильно и неправомерно.

На рис. 6 приведено также физически правильное изображение соотношения электрических векторов внутри изотропного диэлектрика. Математически это соотношение, в отличие от соотношения (2), выглядит так:

$$\epsilon_0 \mathbf{E} = \mathbf{D} + \mathbf{P}'. \quad (3)$$

Заметим, что в скалярной форме данное соотношение полностью идентично традиционному соотношению (2), если последнее представлять как

$$\epsilon_0 \mathbf{E} = \mathbf{D} - \mathbf{P}. \quad (4)$$

Реакцию диэлектрика, обозначаемую однонаправленным вектором поляризованности \mathbf{P} (или \mathbf{P}'), не следует принимать упрощенно. Вторичное электрическое поле каждого отдельного диполя имеет весьма сложный (дипольный) вид. Поэтому говорить об определенной направленности вектора \mathbf{P} следует только как о среднем (макроскопическом) значении реакции диэлектрика на внешнее электрическое поле. В среднем, как известно, эта реакция направлена против внешнего поля. Внутреннее электрическое поле диэлектрика в целом обычно однонаправленно с внешним полем и характеризуется составляющей $\epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$. Это поле может и полностью исчезнуть, что наблюдается в проводниках.

Вектор *поляризованности* \mathbf{P} имеет ясное физическое (и модельное) представление – это *объемная плотность* суммы *электрических дипольных моментов*. Вектор \mathbf{D} в уравнении (3), равный $\epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внеш}}$ и характеризующий внешнее электрическое поле, тоже можно интерпретировать как *объемную плотность* суммарного *электрического дипольного момента*. Только электрические дипольные моменты, образующие поле вектора \mathbf{D} , следует приписывать не вещественным, а виртуальным частицам, возникающим парами [10] и короткое время существующим (чаще всего в виде электрон-позитронных пар) в любом месте пространства (как внутри веществ, так и в вакууме) в соответствии с соотношением неопределенностей Гейзенберга $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$.

Аналогично обозначенной виртуальной *поляризованности* физического вакуума существует, по мнению автора, и своеобразная (виртуальная) *намагниченность* физического вакуума [11].

Приведем еще один довод в обоснование физической значимости вектора \mathbf{D} . Связь этого вектора с вектором \mathbf{E} без участия вектора *поляризованности* определяется выражением

$$\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}. \quad (5)$$

Согласно этому соотношению, увеличение или уменьшение значений ϵ при переходе из одной диэлектрической среды в другую сопровождается обратно пропорциональным изменением значений E . Это эмпирический факт.

Применительно к формуле (5) разногласия предлагаемого подхода и традиционных взглядов можно обозначить так. Если происходит увеличение диэлектрической проницаемости ϵ , то это влечет за собой уменьшение модуля вектора \mathbf{E} внутри диэлектрика. В этом нет разногласий. Но далее имеются отличия: предлагаемый подход исходит из неизменности модуля вектора \mathbf{D} , а традиционная точка зрения настаивает на его увеличении [12, 13], причем зависящем от угла между вектором \mathbf{D} и нормалью к плоскости раздела двух сред.

Вектор \mathbf{D} обычно изображают преломляющимся на границе двух диэлектрических сред, исходя из равенства в двух средах нормальных составляющих вектора \mathbf{D} и различия его тангенциальных составляющих. На вопрос что и как определит «увеличение» или «уменьшение» модуля вектора \mathbf{D} в случае плавных изменений ϵ внутри диэлектрика, ответа нет. Отсюда вывод – линии вектора \mathbf{D} не должны преломляться на границе раздела двух сред и претерпевать изменений внутри сред при любых изменениях ϵ .

В подтверждение верности предлагаемой точки зрения приведем дополнительные обоснования. Для этого рассмотрим более детально

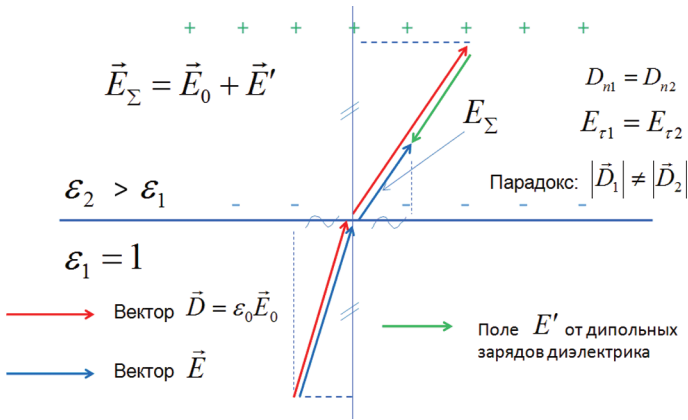


Рис. 8. Поведение электрических векторов на плоской границе двух сред в традиционном представлении

механизм поведения электрических векторов на плоской границе двух диэлектрических сред.

На рис. 8 показано модельное изображение механизма преломления векторов \mathbf{D} и \mathbf{E} , как оно обычно представляется в большинстве книг. Вектор \mathbf{E} здесь изображен с равными тангенциальными составляющими по обе стороны от границы раздела двух сред, а вектор \mathbf{D} – с равными нормальными составляющими. Суммарное ослабляющее действие второй среды с проницаемостью ϵ_2 на электрическое поле в верхней части рисунка показано правильно – в виде вектора, направленного против вектора \mathbf{D} .

Однако, несмотря на правильное направление вектора *поляризованности*, на рис. 8 остается еще один «темный» момент. Принятые условия для векторов означают, что вектор \mathbf{D} в диэлектрике с большей диэлектрической проницаемостью (ϵ_2) обязательно будет увеличенным по модулю, чего при отсутствии свободных электрических зарядов быть не должно.

В дополнение к изложенному можно привести еще один довод. Он касается критики общеизвестного тезиса о равенстве касательных составляющих вектора напряженности электрического поля при произвольном пересечении этим вектором плоской границы двух диэлектрических сред. В книге И.Е. Тамма [14] есть утверждение о непрерывности и равенстве тангенциальных составляющих вектора *напряженности* поля применительно к любой произвольной поверхности и в любой точке потенциального поля.

Однако границу двух сред нельзя отнести к произвольно выбранной поверхности: это особая поверхность с образованием на ней под воздействием внешнего поля связанных *электрических зарядов* с преобладанием связанных зарядов того или иного знака.

Линии напряженности электрического поля, идущие не по нормали к плоскости раздела двух сред, обязательно испытывают преломление, а это означает, что в точках преломления линий вектора \mathbf{E} ротор этого вектора не будет равен нулю. Последнее свидетельствует о том, что электрическое поле на поверхности раздела разных диэлектрических сред по определению нельзя считать потенциальным ($\text{rot } \mathbf{E} \neq 0$). Если же поле на границе двух сред не потенциальное, то требование равенства тангенциальных составляющих вектора \mathbf{E} на этой границе не является обоснованным.

Иллюстрацией описываемого поведения электрических векторов на границе двух диэлектрических сред служит рис. 9. Здесь вектор \mathbf{D} (по масштабу он выбран равным \mathbf{E}_0) не испытывает преломления, т. е. он не зависит от среды. Другой вектор – вектор \mathbf{E}_0 (как и любой вектор \mathbf{E} , пересекающий границу двух сред под углом к нормали) испытывает преломление.

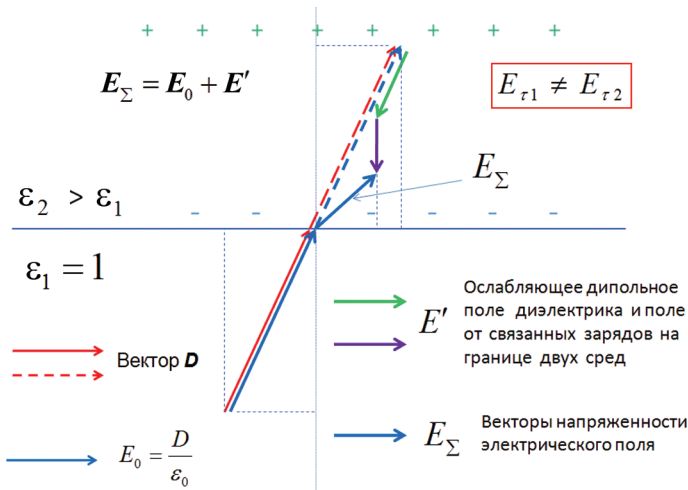


Рис. 9. Предлагаемое изображение электрических векторов на границе раздела двух сред

В модели на рис. 9 причиной преломления вектора \mathbf{E} является не традиционно декларируемое равенство тангенциальных составляющих этого вектора и известная формульная (5) связь с вектором \mathbf{D} , а два других фактора. Первый фактор – это изменение модуля вектора \mathbf{E} ввиду изменения диэлектрической проницаемости среды. Второй фактор – воздействие поля, создаваемого связанными зарядами (преимущественно одного знака), которые образуются на границе раздела двух сред. Последний фактор оказывает на преломление вектора \mathbf{E} преобладающее влияние (см. рис. 9), что подтверждает и практика

(опыты по фокусированию лучей света и радиоволн за счет профиля поверхностей).

Выводы.

1. В настоящее время в учении об электричестве преобладают представления об отсутствии глубокого физического смысла и вспомогательном характере вектора *электрической индукции*, а также о преломлении линий этого вектора на границе двух диэлектрических сред. Указанные представления порождают противоречия в изображении полей и линий электрических векторов \mathbf{E} и \mathbf{D} .

2. Для разрешения этих противоречий предложено вектор *электрической индукции* \mathbf{D} считать физически значимым вектором, который в сумме с вектором *поляризованности* диэлектрика образует вектор $\epsilon_0 \mathbf{E}$, характеризующий электрическое поле внутри диэлектрика.

3. Согласно принципу суперпозиции первичный вектор \mathbf{D} не зависит от реакции материала диэлектрика на внешнее воздействие, а поскольку вектор \mathbf{D} не зависит от среды, то он не преломляется на границе двух сред.

4. Для объяснения наблюдаемых преломлений линий вектора \mathbf{E} на границе двух сред (в условиях описываемого поведения линий вектора \mathbf{D}) предложено модельное изображение, объясняющее механизм такого поведения вектора \mathbf{E} .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иродов И.Е. *Электромагнетизм. Основные законы*. Изд. 4-е, испр. Москва, БИНОМ, Лаборатория знаний, 2003, 320 с.
- [2] Чуев А.С. Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними. *Законодательная и прикладная метрология*, 2007, № 3, с. 30–33.
- [3] Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (дата обращения 02.02.2012).
- [4] Чуев А.С. Полевые электромагнитные величины – фантом или реальность? *Законодательная и прикладная метрология*, 2012, № 3, с. 71–75.
- [5] Зоммерфельд А. *Электродинамика*: пер. с нем. Москва, Изд-во иностр. литры, 1958, 505 с.
- [6] Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. *Электромагнитное поле*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 422 с.
- [7] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. Вып. 5. Москва: Мир, 1966, 296 с.
- [8] Чуев А.С. О методической ошибке в определении физического свойства «восприимчивость» для магнетиков и диэлектриков. *Законодательная и прикладная метрология*, 2013, № 3, с. 51–53.
- [9] Матвеев А.Н. *Электричество и магнетизм*. Москва: Высш. шк., 1983, 463 с.

- [10] Поляризация вакуума. *Физическая энциклопедия*. Т. 4. Гл. ред. А.М. Прохоров. Москва, Сов. энциклопедия, 1994, 704 с.
- [11] Чуев А.С. Магнитное поле – какие векторы первичны и что мы измеряем? *Законодательная и прикладная метрология*, 2012, № 6, с. 45–48.
- [12] Калашников С.Г. *Электричество*. 5-е изд. Москва, Наука, Гл. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1985, 576 с. (Общий курс физики).
- [13] Савельев И.В. *Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм*. Москва, АСТ, 2004, 334 с.
- [14] Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. 11-е изд., испр. и доп. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2003, 616 с.

Статья поступила в редакцию 19.08.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

Чуев Анатолий Степанович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: общая физика, метрология. e-mail: chuev@mail.ru

On new approaches in the description of the stationary electric field inside the dielectric media and at their interface

© A.S. Chuev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents analysis of the known images of stationary electric field inside the dielectric media and at their interface and notes paradoxical nature in these images represented by the various vectors — electrical voltage and electrical induction. We offer other options of fields images that lack the mentioned paradox. However, these options require revision of the established ideas, in particular, the notions of breaking the lines of the electric induction at the interface of two media and the strengthening of the electric displacement inside the dielectric. A new model to explain the behaviour of the electric vector on the boundary between two media is suggested.

Keywords: *electric field, the electric vectors, dielectrics, the principle of superposition.*

REFERENCES

- [1] Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnye zakony* [Electromagnetism. Basic laws]. 4th ed., revised. Moscow, BINOM – Laboratory of Knowledge Publ., 2003, 320 p.
- [2] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya — Legal and Applied Metrology*, 2007, no. 3, pp. 30–33.
- [3] Chuev A.S. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie — Science and Education: Electronic scientific and technical periodical*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (дата обращения 02.02.2012).
- [4] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya — Legal and Applied Metrology*, 2012, no. 3, pp. 71–75.
- [5] Sommerfeld A. *Elektrodynamik*. Band III. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1949. 505 s.
- [6] Martinson L.K., Morozov A.N., Smirnov E.V. *Elektromagnitnoe pole* [Electromagnetic Field]. Moscow, BMSTU Publ., 2013, 422 p.
- [7] Feynman R., Leighton R., Sands M. *Feynman Lectures on Physics. Vol. 5*. Moscow, Mir Publ., 1966, 296 p. [in Russian].
- [8] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya — Legal and Applied Metrology*, 2013, no. 3, pp. 51–53.
- [9] Matveyev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 463 p.
- [10] Prokhorov A.M., chief ed. *Populyarizatsiya vakuuma [Vacuum polarization]. Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical Encyclopedia]. Vol 4. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1994, 704 p.
- [11] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya — Legal and Applied Metrology*, 2012, no. 6, pp. 45–48.
- [12] Kalashnikov S.G. *Elektrichestvo* [Electricity]. 5th ed. Moscow, Nauka Publ., Ch. Editorial of Phys.-Math. literature, 1985, 576 p. (General Course of Physics).

- [13] Savel'ev I.V. *Kurs obshchey fiziki. V 5 knigakh.* [General Physics Course. In 5 books]. *Kniga 2. Elektrichestvo i magnetizm* [Book 2. Electricity and Magnetism]. Moscow, AST Publ., 2004, 334 p.
- [14] Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Basics of the theory of electricity]. 11th ed., rev. and enl. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003, 616 p.

Chuev A.S. (b. 1949) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department at Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include: General Physics, Metrology.
e-mail: chuev@mail.ru