

О СООТНОШЕНИИ И МОДЕЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ВЕКТОРНЫХ ВЕЛИЧИН

Чуев А.С., к.т.н.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Контакт с автором: [chuev@mail.ru](mailto:chuev@mail.ru)

Аннотация: Вопреки широко распространенным представлениям о соотношении электрических векторных величин обосновывается первичность вектора *электрической индукции* и индуцируемого им вектора *поляризованности*, а вектор *напряженности* электрического поля представляется составным и вспомогательным, не имеющим своего модельного представления и глубокого физического смысла. Приводятся наглядные изображения соотношений электрических векторных величин, в том числе на плоской границе двух изотропных диэлектрических сред. Предложено по-новому определять диэлектрическую восприимчивость веществ.

Ключевые слова:

Электрическое поле; диэлектрики; электрические векторы; диэлектрическая восприимчивость; поле в вакууме.

В электростатике широко известно и повсеместно применяется алгебраическое соотношение трех электрических векторных величин: *индукции электрического поля*  $\vec{D}$ , *напряженности поля*  $\vec{E}$  и *поляризованности*  $\vec{P}$ :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (1)$$

В этом соотношении  $\varepsilon_0$  - *электрическая постоянная*, именовавшаяся ранее *диэлектрической проницаемостью* вакуума.

Обычно электрические векторы  $\varepsilon_0 \vec{E}$  и  $\vec{P}$  для изотропных диэлектриков изображают одинаково направленными, а вектор  $\vec{D}$  трактуют как суммарный и вспомогательный, не имеющий глубокого физического смысла [1-3]. Наглядное изображение соотношения векторов, соответствующее выражению (1), представлено на рис.1. Это соотношение традиционное. Все три вектора изображены здесь совпадающими по направлению, хотя известно, что в диэлектриках внешнее электрическое поле ослабляется и вектор *поляризованности*, по

идея, должен был бы иметь направление против внешнего электрического поля. Почему это не так, попробуем разобраться. Рассматриваем только изотропные диэлектрики.



Рис.1. Соотношение электрических векторов в традиционном представлении.

Поскольку вектор  $\vec{D}$  считается составным и вспомогательным, то на рис. 1 он изображен пунктирной линией. Векторы  $\epsilon_0 \vec{E}$  и  $\vec{P}$  имеют, как это общепринято, одинаковую направленность, а их сумма равна вектору  $\vec{D}$ .

Составляющую  $\epsilon_0 \vec{E}$  в соотношении (1) принято считать основной и первичной для электрического поля внутри диэлектрика, но при этом роль *поляризованности*  $\vec{P}$  в правой части выражения не очень ясна и понятна. Если  $\epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E}_{\text{внутр}}$  - это остаток внешнего электрического поля, ослабленного поляризацией диэлектрика, то наличие вектора  $\vec{P}$  совершенно излишне. Второй вопрос - о правомерности алгебраического сложения физических величин совершенно разных по физической сути. Складывать и вычитать можно только физически подобные величины.

Совершенно ясное модельное представление имеет вектор *поляризованности*  $\vec{P}$ . Поскольку операция алгебраического сложения с участием этой величины возможна только с подобной величиной, то на эту роль подходит лишь вектор  $\vec{D}$ . Он имеет ту же размерность и аналогичное модельное представление – в виде объемной плотности суммарного электрического дипольного момента виртуальных частиц вакуума [4, 5].

Кроме того, при увеличении вектора *поляризованности*  $\vec{P}$  составляющая  $\epsilon_0 \vec{E}$  в выражении (1) уменьшается в размере и может совершенно исчезнуть, что наблюдается в проводниках. Если одна величина уменьшается, а другая возрастает за счет первой, то следует искать третью – ответственную за этот процесс. Как правило, уменьшаемая величина не может быть причиной увеличиваемой, причина кроется в чем-то ином.

По мнению автора, истинное соотношение электрических векторных величин в изотропных диэлектриках следующее. Первичным является внешнее электрическое поле, характеризуемое вектором  $\vec{D}$ :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_{внешн} = \epsilon_0 \vec{E}_0. \quad (2)$$

Вектор  $\vec{D}$  вполне реален в существовании ввиду наличия в вакууме виртуальных пар элементарных частиц, уже давно предсказанных квантовой механикой и соотношением неопределенностей Гейзенберга [6]. Виртуальные пары частиц (многие считают их электрон-позитронными [5]) видимо присутствуют и внутри вещественных образований, вызывая поляризацию диэлектриков и намагничивание магнетиков. Если это так, то соотношение электрических векторов внутри диэлектрика должно соответствовать рис.2.

**Исправленное соотношение электрических векторов  $E$ ,  $P$  и  $D$  внутри диэлектрика.**  

$$\epsilon_0 \mathbf{E}_{внутр} = \mathbf{D} + \mathbf{P}^*$$

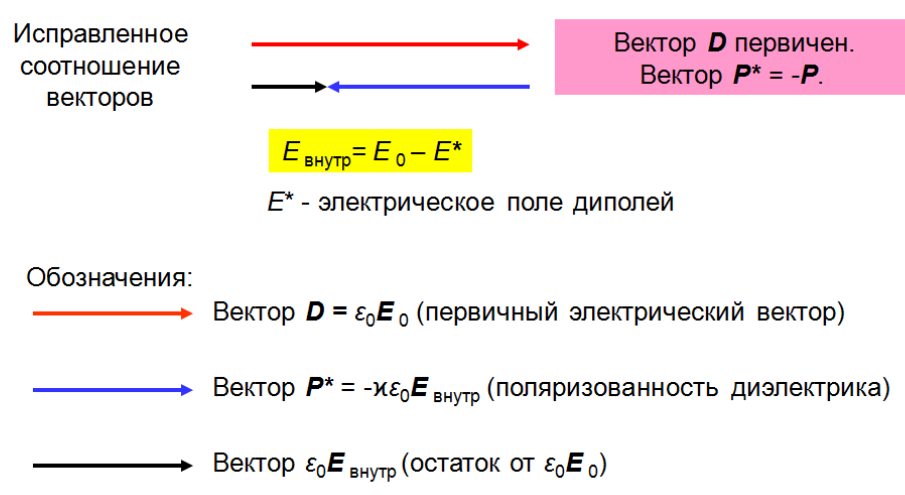


Рис.2. Исправленное соотношение электрических векторов

В этом варианте все становится на свои места. *Поляризованность* диэлектрика  $\vec{P}^*$  возникает как вещественная реакция на «возбужденное» состояние (поляризацию) вакуума и данный вектор имеет направление, противоположное вектору  $\vec{D}$ . Оба эти вектора суммарно

создают результирующее электрическое поле внутри диэлектрика, представленное на рис.2 в виде соотношения  $\varepsilon_0 \vec{E}_{внутр}$ . Теперь это векторное соотношение оказывается составным и вспомогательным, не имеющим глубокого физического смысла.

Оба алгебраически суммируемых вектора  $\vec{D}$  и  $\vec{P}^*$  имеют одинаковую размерность и одинаковое модельное представление. *Напряженность* же электрического поля, входящая в выражение  $\varepsilon_0 \vec{E}_{внутр}$ , как и все системно полевые [7] электромагнитные величины своего модельного представления не имеет и, скорее всего, является величиной вспомогательной (расчетной) [8]. Для согласования физических величин с разной размерностью служит электрическая постоянная  $\varepsilon_0$ .

Казалось бы, на этом наши исправления соотношений электрических величин закончились, но это не так. Перевод вектора  $\vec{D}$  из разряда вспомогательных величин в разряд первичной физической величины, характеризующей электрическое поле свободного пространства (вакуума), заставляет нас обратиться к методологически верному принципу суперпозиции. Согласно этому принципу, результирующее электрическое поле внутри диэлектриков (составляющая  $\varepsilon_0 \vec{E}_{внутр}$ ) образуется путем линейного наложения первичного поля вектора  $\vec{D}$  и вторичного поля вектора  $\vec{P}^*$ . Интенсивность первичного поля внутри диэлектрика естественно убывает (за счет поляризации) и возникает вопрос о том, относительно какой величины следует определять вектор *поляризованности* (через *восприимчивость* диэлектрика), относительно первичной или конечной. Если определять, как принято, относительно конечной величины  $\vec{E}_{внутр}$ , то снова возникает вопрос – не излишне ли присутствие вектора  $\vec{P}^*$ ? По идее, конечный вектор электрического поля следовало бы тоже описывать в размерности векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{P}^*$ , но исторически сложилась практика его описания через *напряженность* остаточного поля  $\vec{E}_{внутр}$  с участием  $\varepsilon_0$ .

В вариантах соотношений векторов по рис.1 и рис.2 вектор *поляризованности* (неважно какой) определялся как произведение *диэлектрической восприимчивости* на *электрическую постоянную* и на суммарный вектор *напряженности электрического поля*. Это результирующее поле, остающееся внутри диэлектрика после ослабления внешнего поля за счет поляризации. Вектор *поляризованности* в соотношении векторов по рис.1:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 E_{внутр} . \quad (3)$$

В соотношении векторов по рис.2:

$$\vec{P}^* = -\chi \varepsilon_0 E_{внутр} . \quad (4)$$

Эти два выражения отличаются только знаком. Данные выражения будут определяющими (с учетом разницы в знаке) и для привычной *диэлектрической восприимчивости*  $\chi$ . Но если сравнить получаемое из (3) или (4) определение *диэлектрической восприимчивости* с определением *магнитной восприимчивости*  $\chi_m = H / J$ , то можно заметить принципиальную разницу. В электричестве и в магнетизме реакция вещества на внешнее полевое воздействие определяется по-разному. Напомним, в электричестве вектор  $\vec{D}$  подобен вектору  $\vec{H}$ , а вектор  $\vec{P}^*$  подобен вектору  $\vec{J}$ .

Чтобы определение *диэлектрической восприимчивости* было эквивалентно определению аналогичной характеристики в магнетизме, вектор *поляризованности*  $\vec{P}^*$  должен определяться не от конечной составляющей  $\epsilon_0 \vec{E}_{внутр}$ , которая может быть очень малой (пример, вода), а от первичного (внешнего) уровня электрического поля, характеризуемого вектором  $\vec{D}$ . В этом случае картина соотношения электрических векторов будет иметь вид, представленный на рис.3. Рис.3 аналогичен рис.2 во всем, кроме определения вектора  $\vec{P}^*$ . Здесь этот вектор определен через вектор  $\vec{D}$ .

Однако новое определение вектора  $\vec{P}^*$  требует изменения значений *диэлектрической восприимчивости*. Оценим эти изменения. Сам вектор  $\vec{P}^*$  остается неизменным, так как он физически вполне определен и его изменять нельзя. Новую *диэлектрическую восприимчивость* обозначим  $\chi^*$  и отыщем ее связь с традиционной *восприимчивостью*  $\chi$  и с *относительной диэлектрической проницаемостью*  $\epsilon$ .

**Исправленное соотношение электрических векторов  $E$ ,  $P$  и  $D$  внутри диэлектрика.**  

$$\epsilon_0 E_{внутр} = D + P^*$$



- Обозначения:
- Вектор  $D = \epsilon_0 E_0$  (первичный электрический вектор)
  - Вектор  $P^* = -\chi^* \epsilon_0 E_0$  (поляризованность диэлектрика)
  - Вектор  $\epsilon_0 E_{внутр}$  (остаток от  $\epsilon_0 E_0$ )

Рис.3. Соотношение электрических векторов с новым определением диэлектрической восприимчивости

Новая *диэлектрическая восприимчивость*  $\chi^*$ , если ее определять по аналогии с *магнитной восприимчивостью*, должна определяться соотношением первичного вектора  $\vec{D}$  и нашего нового вектора *поляризованности*  $\vec{P}^*$ , направленного против внешнего поля:

$$\vec{P}^* = -\chi^* \vec{D}, \quad (3)$$

где:  $\chi^*$  - по-новому определяемая *диэлектрическая восприимчивость*, значения которой, учитывая противоположную направленность векторов, видимо, должны быть отрицательные (тогда в формуле (3) минус будет не нужен).

Очевидно, что значения  $\chi^*$  должны отличаться от значений привычной *диэлектрической восприимчивости* и по своему размеру. Новые значения  $\chi^*$  будут находиться в пределах от 0 до 1, причем единичное значение будет соответствовать проводникам, внутри которых внешнее электрическое поле компенсируется полностью, а малые или близкие к нулю значения  $\chi^*$  будут соответствовать диэлектрикам со слабой поляризуемостью.

Если считать верным наше новое соотношение электрических векторов

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \vec{D} + \vec{P}^* \quad (4)$$

и использовать известное соотношение

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

то в скалярной форме можно записать следующие соотношения:

$$\varepsilon_0 E = D - P^* = D - \chi^* D = (1 - \chi^*) D, \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 E = (1 - \chi^*) \varepsilon \varepsilon_0 E. \quad (7)$$

Из последнего выражения определяем:

$$\varepsilon = 1 / (1 - \chi^*). \quad (8)$$

Значение *относительной диэлектрической проницаемости*  $\varepsilon$  для проводников будет бесконечно большим, а для диэлектриков со слабой поляризуемостью близким к единице. Как видим, крайние значения  $\varepsilon$  совпадают с привычными значениями. В этом результате есть определенный смысл. Потенциальное электрическое поле внутри проводников беспрепятственно распространяется по всем направлениям (потенциал проводника един), а в диэлектриках распространение электрического поля качественно совсем иное и не сильно отличается от распространения в вакууме.

Сравнивая новое выражение для *относительной диэлектрической проницаемости*  $\varepsilon$  с известным выражением, используемым в системе СИ, можно определить соотношение

значений новой *диэлектрической восприимчивости*  $\chi^*$  и привычной  $\chi$ . Принимая выражение (8) равным обычному соотношению величин  $\chi$  и  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 1/(1 - \chi^*) = (1 + \chi), \quad (9)$$

можно определить

$$\chi^* = \chi / (1 + \chi) \quad (10)$$

$$\chi = \chi^* / (1 - \chi^*) \quad (11)$$

При малых значениях  $\chi^*$  и  $\chi$  они не сильно отличаются по величине, а для сравнительно больших значений  $\chi$  отличие будет существенным. Например, для воды известная диэлектрическая восприимчивость к постоянному электрическому полю равна 80 (непонятно только относительно чего это значение 80 и где верхний предел). Новое значение  $\chi^*$  для воды будет близко к единице, то есть почти равное значению для проводников.

На практике в качестве характеристики диэлектриков чаще используют не *диэлектрическую восприимчивость*, а *относительную диэлектрическую проницаемость*, определяемую выражением (9). Согласно этому выражению, при использовании новых значений  $\chi^*$  крайние значения относительной *диэлектрической проницаемости* веществ (0 и  $\infty$ ) остаются неизменными, но средние значения претерпевают существенные изменения.

Предлагаемое новое соотношение электрических векторов позволяет по-новому взглянуть на многие положения, примеры и задачи электростатики, содержащиеся в учебниках, ставших классическими. Так например на рис.4 приведено изображение полей на границе двух сред из учебника Иродова [2, стр.95 (рис. 3.18)].

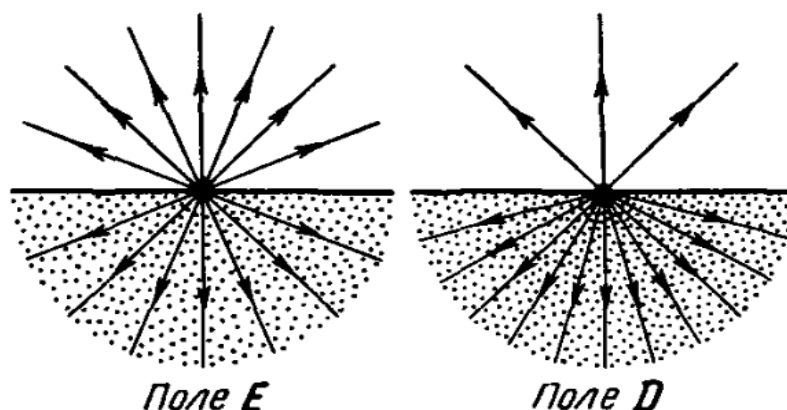


Рис.4. Изображение стационарных полей  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  (по Иродову) от электрического заряда на границе перехода вакуум – диэлектрик

Изображение по рис.4, в принципе, соответствует формульному соотношению (1) и принятому в электростатике направлению вектора *поляризованности*  $\vec{P}$  от отрицательного заряда к положительному. Однако данное изображение не соответствует элементарной логике. Электрическое поле внутри диэлектрика всегда ослабляется из-за поляризации диэлектрика, поэтому поле в диэлектрике, по сравнению с вакуумом, должно изображаться с меньшей густотой линий. Выше сказанному противоречат оба изображения рис.4.

Правильное изображение полей векторов  $\vec{D}$ ,  $\vec{P}' = \vec{P}^*$  и  $\vec{E}$ , отличное от изображения электрических полей в книге Иродова, приведено на рис.5.

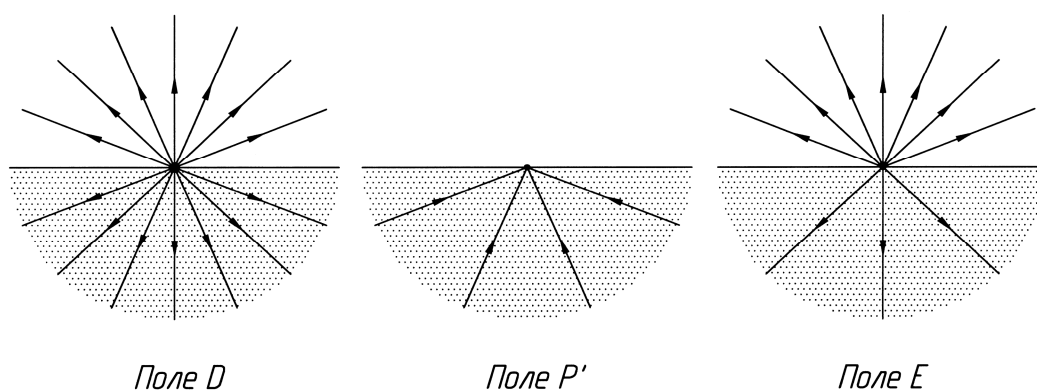


Рис.5. Правильное изображение полей векторов  $\vec{D}$ ,  $\vec{P}' = \vec{P}^*$  и  $\vec{E}$  от одиночного электрического заряда, расположенного на границе вакуум – диэлектрик

На рис.5 поле вектора  $\vec{P}^*$  направлено против первичного поля вектора  $\vec{D}$ , поэтому в диэлектрике оно показано как более слабое поле вектора  $\vec{E}$ . То же поле вектора  $\vec{E}$  в вакууме (в отличие от рис.4) показано более сильным, что вполне логично.

Основное возражение, которое выдвигается оппонентами рассматриваемого здесь соотношения электрических векторов, это недопустимость изображения поля вектора  $\vec{E}$  с неравными тангенциальными составляющими вектора на границе раздела двух сред (рис.4), так как циркуляция вектора  $\vec{E}$  не будет равной нулю.

В качестве обратного возражения можно привести следующие доводы. Во-первых, на границе двух диэлектриков циркуляция вектора  $\vec{E}$  по замкнутому контуру может и не быть равной нулю, это не проводники. Все на опыте знакомы с явлением возникновения мощных электрических разрядов, возникающих при соприкосновении и разъединении двух различных диэлектриков (при смене одежды) и трение здесь не главное. В случае если один из диэлектриков активный (электрет или пьезоэлемент), то он может обладать собственным полем и тогда вычисление циркуляции по замкнутому граничному контуру обязательно дает разность электрических потенциалов. На практике известен эффект поверхностного воздуш-

ного пробоя по боковой поверхности пьезоэлементов. Этот эффект значительно уменьшается при введении дополнительной изоляции боковой поверхности пьезоэлемента.

Во-вторых, если детально рассматривать поле вектора  $\vec{E}$  вблизи плоской поверхности раздела двух сред, то равенство тангенциальных составляющих этого вектора может обеспечиваться частичным поворотом линий поля вблизи границы раздела. Известно, что вблизи раздела вакуума с металлом (предельный случай приграничной разницы диэлектриков) линии поля вообще становятся перпендикулярны границе раздела сред. Нарисовать картинку типа рис.4 мы можем любую, но не все будет соответствовать действительности.

Следует отметить, что правильность примера, приведенного в учебнике Иродова, формально подтверждается расчетом с использованием известного метода изображений [9, стр. 23], однако насчет универсальности этого метода и адекватности его применения к рассматриваемой задаче у автора есть большие сомнения.

Приведем другой, более простой пример с некорректной, по мнению автора, трактовкой соотношения нормальных составляющих электрических векторов при пересечении полем плоской границы раздела двух диэлектриков [3, стр. 146-147]. Копия книжной иллюстрации данного примера приведена на рис.6.

85

Знак поверхностного заряда и поведение нормальных составляющих напряженности поля и поляризованности при пересечении границы в различных направлениях

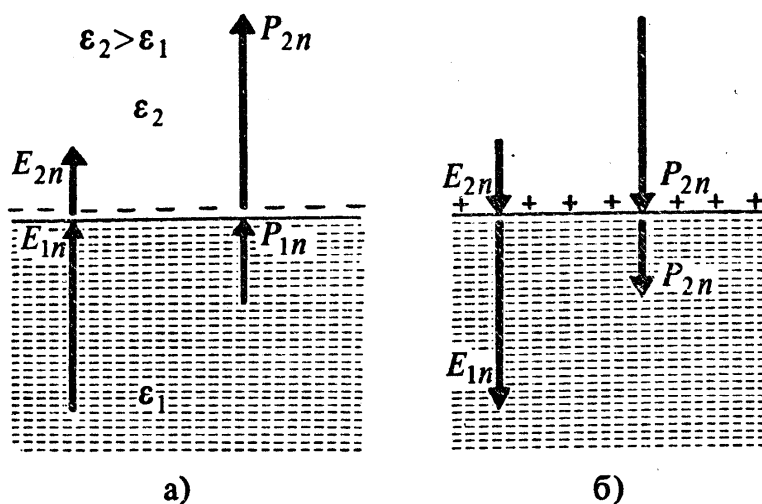


Рис.6. Изображение электрических векторов из книги Матвеева А.Н.

Основные недостатки приведенного на рис.6 изображения следующие: это одинаковая направленность векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{P}$ , отсутствие множителя  $\epsilon_0$  у вектора  $\vec{E}$  (при отсутствии  $\epsilon_0$  векторы невозможно складывать и сравнивать) и отсутствие на изображениях вектора  $\vec{D}$ . Хотя вектор  $\vec{D}$  на рис.6 не изображен, принимая все векторы нормальными к гра-

нице раздела двух сред, этот вектор (в общепринятом представлении) можно обнаружить путем сложения двух показанных векторов в каждой из сред.

Более правильное, на наш взгляд, изображение того же примера приведено на рис.7. Вектор *поляризованности*  $\vec{P}$  здесь показан с общепринятым направлением (от отрицательного связанного заряда к положительному). В результате он совпадает с направлением приложения внешнего поля - направлением вектора  $\vec{D}$ , который тоже приводится. Однако в реальности вектор  $\epsilon_0 \vec{E}$  должен представлять собой остаток вектора  $\vec{D}$  после его уменьшения на вектор  $\vec{P}^*$ . Естественно, что направление вектора  $\vec{P}^*$  будет противоположно вектору  $\vec{D}$ , а векторы  $\epsilon_0 \vec{E}$  и  $\vec{D}$  всегда будут иметь одинаковое направление.

На рис. 7 можно было бы изобразить каждый вектор по отдельности и примыкающим к границе раздела двух сред, как это выполнено на рис.6, но получаемая при этом картина изменения векторов, по мнению автора, менее ценна по сравнению с представлением об их суммарном соотношении.

Для большей наглядности на наших рисунках полуплоскость диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью изображена с более плотной заливкой.

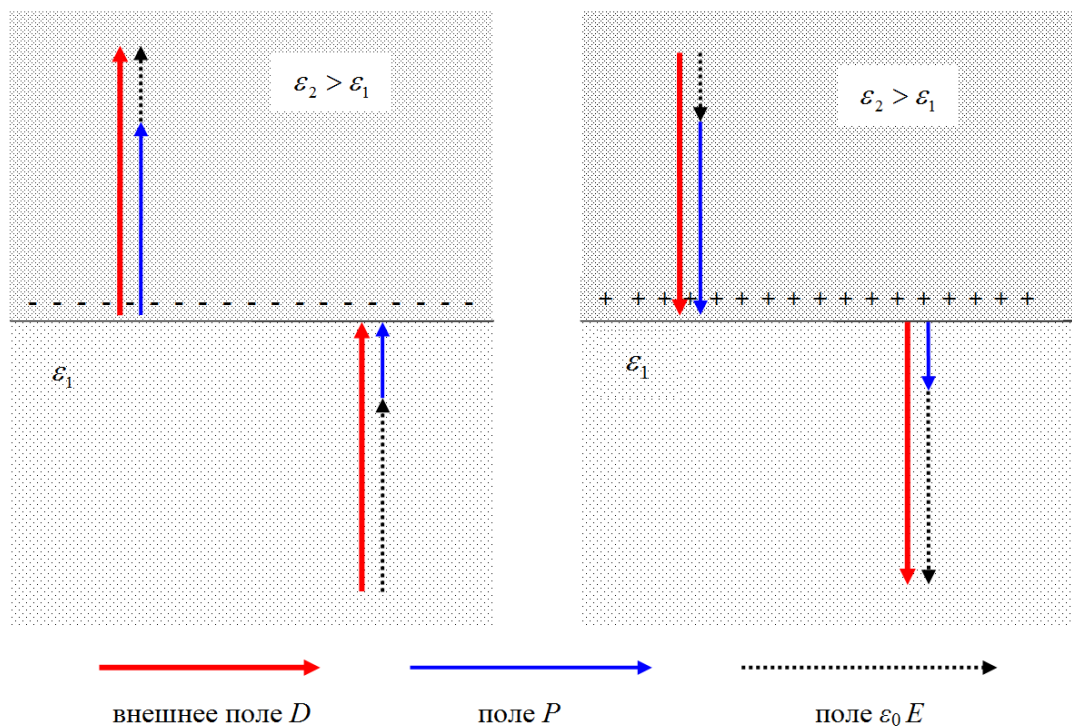


Рис.7. Соотношения нормальных составляющих электрических векторов внутри диэлектриков при пересечении их границы внешним полем в различных направлениях

Главное отличие данного изображения соотношения электрических векторов от их изображения по рис.6 состоит в том, что здесь исходным (первичным) вектором является вектор  $\vec{D}$ . Реакцию диэлектриков на внешнее поле характеризует вектор  $\vec{P}$ , а составным и

вспомогательным вектором будет вектор  $\varepsilon_0 \vec{E}$ . Первые два вектора имеют смысл *объемной плотности электрического дипольного момента*. Данная физическая величина имеет достаточно понятное модельное представление.

Однако еще более правильным будет изображение вектора *поляризованности*, направленным против вектора  $\vec{D}$ . Ведь по отношению к внешнему полю диэлектрики подобны диамагнетикам. Такое изображение соотношения векторов представлено на рис.8.

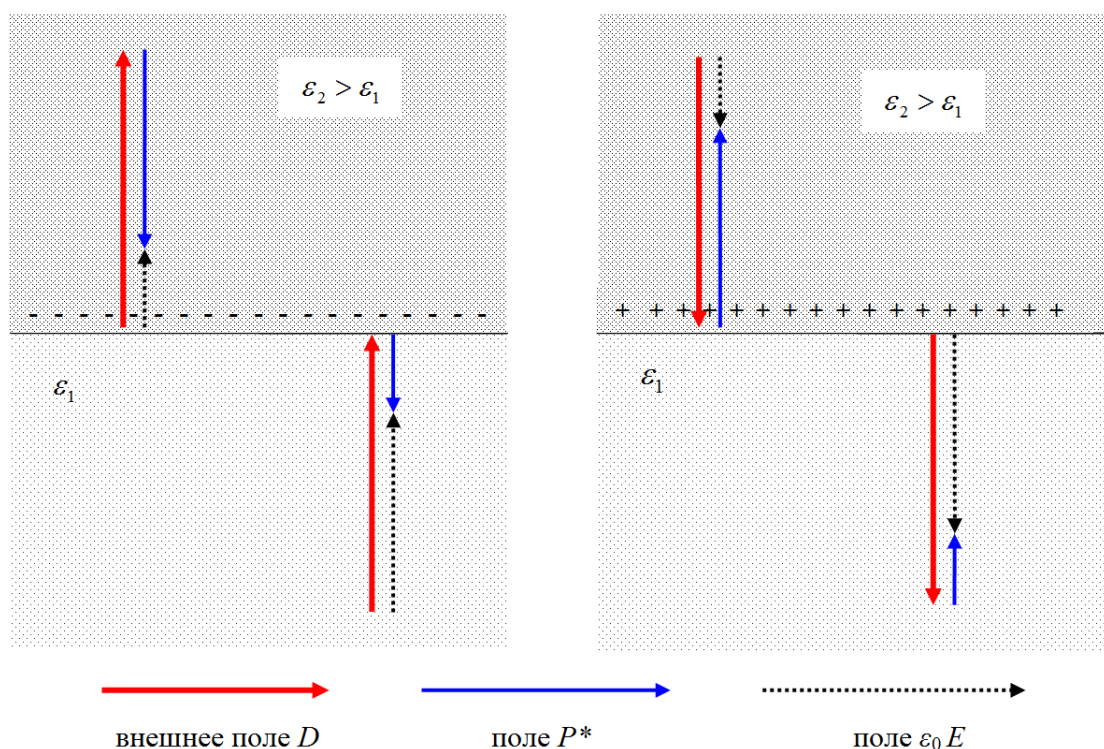


Рис.8. Более правильное изображение соотношения нормальных составляющих электрических векторов внутри диэлектриков при пересечении внешним полем плоской границы двух сред в различных направлениях ( $P^*$  - штрихованный вектор  $P$ )

В завершение статьи коротко выскажемся о целесообразности практического осуществления замены *напряженности* электрического поля на модельно представимую *поляризованность*, а также определения по-новому *диэлектрической восприимчивости*.

Отметим, что первые три рисунка содержали в порядке дублирования наших рассуждений привычные и интуитивно понятные формулы, выражающие соотношение *напряженностей* внешнего поля  $E_0$ , поля электрических диполей диэлектрика  $E^*$  и результирующего поля  $E_{внутр}$  внутри диэлектрика. Первая и третья из указанных характеристик легко определяются в опытах с плоским воздушным конденсатором, в который вводится диэлектрик. В этой связи поле электрических диполей  $E^*$  или его выражение через «материальный» параметр  $P^*$  представляет лишь теоретический интерес. Для практики не столь важным является и направленность этого поля. Однако с физической точки зрения эти вопросы

крайне важны, они ведут нас к правильному пониманию соотношения электрических векторов, что такое поле и «физический вакуум», что вакуум может обладать такими характеристиками как *поляризованность* и *намагниченность*.

Действующее определение *восприимчивости* диэлектриков относительно остаточного, а не первичного внешнего уровня поля, можно приравнять к следующей бытовой картине. Муж, получая зарплату ( $\vec{D}$ ), отдает большую ее часть жене на бытовые расходы ( $\vec{P}^*$ ), но часть зарплаты оставляет себе в заачку ( $\varepsilon_0 \vec{E}_{\text{внутр}}$ ), переводя ее в доллары ( $\vec{E}_{\text{внутр}}$ ) по соответствующему курсу ( $\varepsilon_0$ ). Так вот, если оценивать степень отношения денежного бюджета жены к заачке мужа, это и будет аналогом принятого на сегодня определения *диэлектрической восприимчивости*.

Параметр, представляющий собой отношение уменьшающей что-либо величины к результирующему остатку, автору представляется просто абсурдным.

### Выводы

1. Первичным электрическим полем вне и внутри диэлектриков является поле вектора  $\vec{D}$ . Это поле модельно представимо как объемная плотность суммарного электрического дипольного момента, которым обладают возникающие на короткое время и исчезающие виртуальные пары элементарных частиц вакуума.

2. Вектор  $\vec{D}$  аналогичен вектору *поляризованности* по размерности и по модельному представлению. Оба вектора, алгебраически складываясь, образуют результирующее поле, описываемое, как правило, в виде произведения *электрической постоянной* и вектора *напряженности* поля внутри диэлектрика. Данное составное выражение является вспомогательным и не имеющим глубокого физического смысла.

3. Предложено новое определение диэлектрической восприимчивости веществ. Ее предлагается определять по аналогии с магнитной восприимчивостью от первичного вектора  $\vec{D}$ . При этом крайние значения относительной *диэлектрической проницаемости* (0 и  $\infty$ ) остаются неизменными, но средние значения претерпевают существенные изменения.

### Источники информации:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 2: Электричество и магнетизм: Учеб. Пособие для втузов. – М.: «Издат. АСТ». 2004. -334 с.

2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 4-е испр.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2003. – 320 с.

3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа. 1983. – 463 с.
4. Зельдович Я. Б. Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии. Успехи физических наук, т. 133, вып. 3, 1981, март, с. 479—503.
5. Смолянский С.А. Вакуумное рождение частиц в сильных электромагнитных полях. // Соросовский образовательный журнал, 2001, № 2, с. 69-75.
6. Шредингер Э. К принципу неопределенностей Гейзенберга. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976. стр.210-217.
7. Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. - № 2. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (дата обращения: 2.02.2012).
8. Чуев А.С. Полевые электромагнитные величины – фантом или реальность? // «Законодательная и прикладная метрология». 2012. №3. С. 71-75.
9. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. – М.: «Наука». 1982. 620 с.