

О физических парадоксах как узловых (памятных) точках изложения учебного материала по курсу физики

07, июль 2015

Чуев А. С.

УДК: 378; 37.02; 537.21

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}chuev@mail.ru

Интерес к познанию начинается с удивления. Удивление в нашем сознании возникает как реакция на парадокс в наблюдаемой действительности.

Парадокс – это неожиданное формально-логическое противоречие, возникающее в сознании при встрече с фактом, противоречащим накопленному до этого момента объему знаний. Поэтому для возникновения или создания ощущения парадокса у воспринимающего лица в первую очередь должен быть определенный и хорошо усвоенный объем знаний. Применительно к процессу обучения должен быть определенный объем знаний, соответствующих программе учебного курса по тому или иному предмету.

Удивительное, как известно, надолго или навсегда запечатлевается в человеческой памяти, поэтому рассмотрение физических парадоксов становится теми памятными узелками, которые призваны способствовать лучшему усвоению студентами вузовского курса физики. Рассмотрение парадоксов способствует и углубленному пониманию физики. В работе [1] отмечается, что «при рассмотрении того или иного теоретического парадокса приходится обращаться к наиболее принципиальным положениям теории и иногда пересматривать и уточнять связанные с ней представления».

Учебный материал по курсу физики в вузовском образовании в настоящее время достаточно хорошо отработан, поэтому уделять внимание имеющемуся объему традиционных знаний мы не станем. Остановимся на перечислении и, по возможности, рассмотрении парадоксов, которые обнаруживаются в курсе физики и которые можно использовать в учебной практике для возбуждения интереса студентов к творческому познанию этого предмета. При рассмотрении будем придерживаться рассмотрения парадоксов, встречающихся в традиционных разделах физики.

Для начала можно высветить физический парадокс общего плана, касающийся системного взгляда на физические величины и их взаимосвязи, познаваемые как физические закономерности, выражаемые в математической форме.

В химии известна и широко используется система химических элементов Д.И. Менделеева. Подобными элементами в физике являются физические величины, которые характеризуются единицами измерения и размерностями. Задача классификации физических элементов в систему, подобную системе химических элементов, в настоящее время тоже возможна. О такой возможности сегодня мало кто знает, поэтому у студентов, вчерашних школьников, от этой новости обычно возникает удивление.

При рассмотрении этого вопроса следует объяснить возможность использования различных подходов и принципов классификации физических величин, отметив как наиболее перспективный размерностный метод, позволяющий обнаруживать в системе не только общую структуру физических величин, но и обнаруживать закономерные связи величин и производить поиск и открытие новых физических закономерностей. Данное качество можно сравнить с тем, как если бы в таблице Менделеева была возможность с помощью формального геометрического правила обнаруживать возможные химические соединения элементов. По вопросу системности физических величин можно использовать авторские публикации [2-3] и публикации других авторов [4-7].

Раздел механики. Этот раздел в педагогическом плане кажется наиболее известным и проработанным, в нем невозможно обнаружить парадоксы. Однако это не совсем так. Во-первых, есть хорошо известные парадоксы специальной и общей теории относительности [1]. Далее имеется множество парадоксов, связанных с гравитацией (эффект Джанибекова, суперротация атмосфер планет, дифференциальное вращение Солнца и жидкостно-газовых планет). Темных и неясных вопросов множество. Мне всегда доставляет удовольствие доводить до студентов информацию о парадоксе синфазных изменений кинетической и потенциальной энергий в бегущих механических и звуковых волнах. Эффект удивления студентов этой информацией всегда гарантирован.

Раздел молекулярной физики и термодинамики. В данном разделе имеются парадоксы, связанные с наличием у холодильных машин КПД, превышающего 100%. Имеется множество парадоксов МКТ, описанных в работах [8, 9]. Темных и неясных вопросов в физическом описании тепловых процессах на сегодня значительно больше, чем в механике.

Раздел электромагнетизма. В этом разделе физики парадоксов встречается наибольшее количество, начиная с того, что мы не знаем, что собой представляют электрический заряд и электрический ток – главные физические величины электромагнетизма. Отдельные парадоксы, замеченные автором, не столь известны, поэтому остановимся на них подробнее.

Убедительно объясняется и хорошо понимается студентами парадокс изображения магнитного поля в известном учебнике Иродова [10]. Это изображение магнитного поля от проводника с током, расположенного на границе магнетик-вакуум (рис. 1).

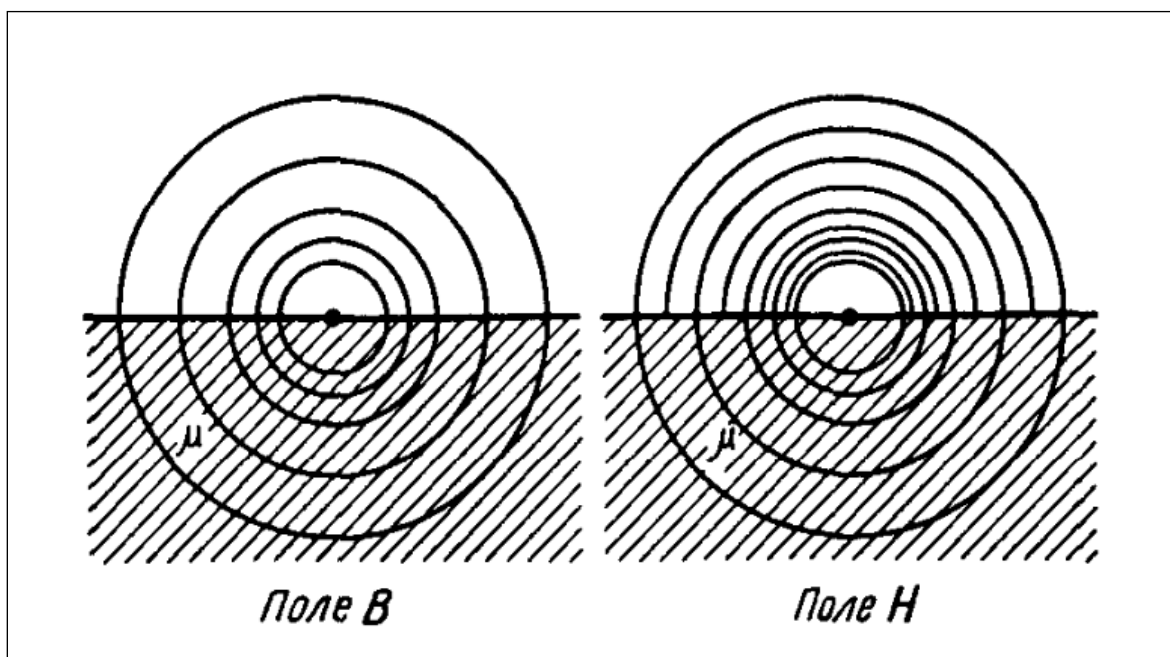


Рис. 1. Парадоксальное изображение магнитных полей **B** и **H**

На данном рисунке для поля **B** не выполняется фундаментальный закон Био-Савара-Лапласа, согласно которому элементарная составляющая индукции магнитного поля в любой среде с относительной магнитной проницаемостью μ определяется выражением:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}.$$

Согласно этому выражению поле **B** на рис. 1 должно быть усиленным в магнетике (если он пара- или ферромагнетик) и ослабленным (относительно вакуума) в диамагнетике, поскольку формула этого закона содержит относительную магнитную проницаемость μ . Поле **H** на рис. 1, наоборот, не должно зависеть от среды, поскольку известная теорема о циркуляции вектора **H** не содержит μ . Все сказанное вполне очевидно, но авторитет учебника тоже играет свою роль.

Приведенный парадокс разрешается, если известное соотношение для магнитных векторов **B** и **H** записывать в чуть-чуть измененном виде:

$$\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{H} + \mathbf{J}.$$

Однако из этого чуть подправленного соотношения, при непредвзятом взгляде, вытекает первичность и физическая значимость вектора **H**, а также составной и вспомогательный характер вектора магнитной индукции **B**. При этом хорошо знакомое выражение $\text{div}\mathbf{B} = 0$, известное как четвертое уравнение Максвелла в дифференциальной форме, оказывается не всегда верным. Верным аналогичное выражение будет применительно к вектору **H**.

Если, как мы показали, вектор $\mathbf{H}$ не зависит от вещественной среды, то неизбежно следует вывод о необходимости пересмотра условий поведения магнитных векторов на границе двух сред. При этом ставится под сомнение известное положение о равенстве нормальных составляющих вектора $\mathbf{B}$ и равенстве тангенциальных составляющих вектора $\mathbf{H}$. А это уже простор для творчества и критического анализа основ электромагнетизма, что увлекательно для студентов. Молодежь всегда радикальна и любит посягать на устоявшиеся взгляды.

Подобные парадоксальные примеры, побуждающие новые мысли, имеются и в разделе электростатики. На рис. 2 приведено известное изображение электрических полей $\mathbf{E}$ и $\mathbf{D}$ от заряда, расположенного на границе диэлектрик-вакуум [10].

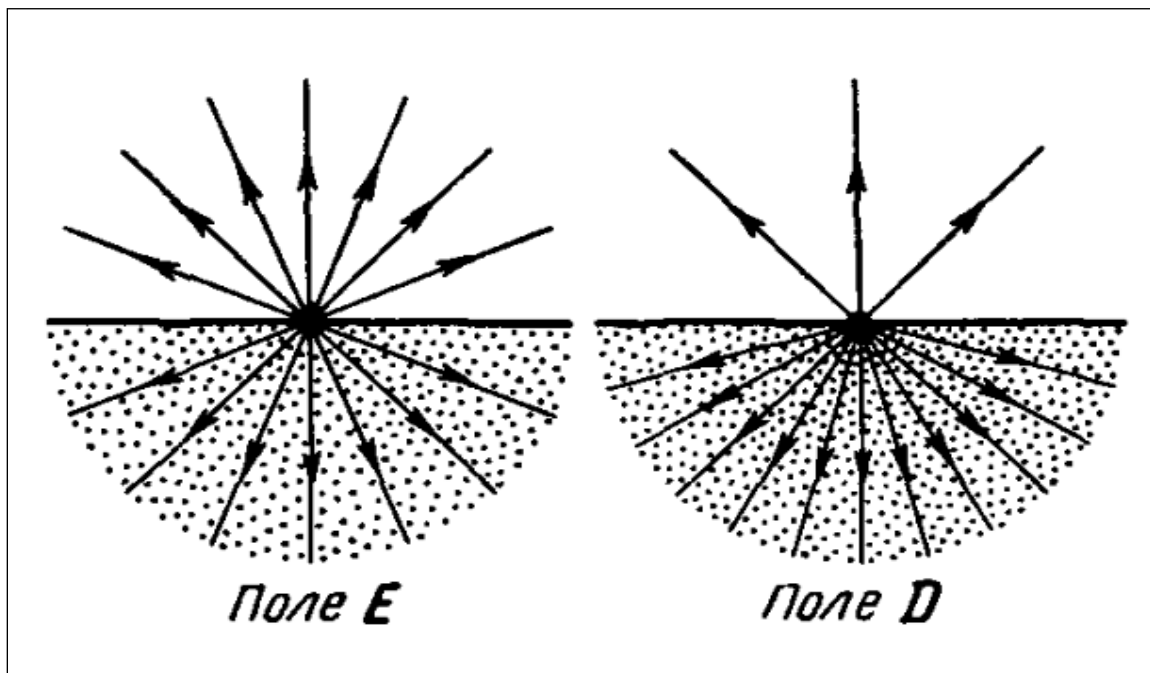


Рис. 2. Изображения стационарных полей $\mathbf{E}$ и $\mathbf{D}$ (по Иродову) от электрического заряда, расположенного на границе вакуум – диэлектрик

Так же как и в рассмотренном выше примере, изображения рис. 2 не соответствуют фундаментальным соотношениям, теперь электростатики:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{q}{4\pi r^2} \mathbf{e}_r;$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E} = \frac{q}{4\pi r^2} \mathbf{e}_r.$$

По этим соотношениям поле $\mathbf{E}$ внутри диэлектрика должно быть ослабленным из-за присутствия в первом выражении относительной диэлектрической проницаемости ϵ , а поле $\mathbf{D}$ обязано быть симметричным и не претерпевающим изменений от среды, поскольку $\mathbf{D}$ от ϵ не зависит. Последнее подтверждается известной теоремой Гаусса для вектора $\mathbf{D}$.

На рис. 1 не хватает изображения еще одних линий – линий электрического поля от *поляризованности* диэлектрика. Вектор *поляризованности* когда-то условились изображать с направлением от отрицательных связанных зарядов к положительным, но это было крайне неудачное решение. В реальности *поляризованность* диэлектрика ослабляет внешнее поле и линии поля, создаваемого поляризацией диэлектрика должны иметь направление против линий внешнего поля $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_0$, что более правильно с физической точки зрения. В этом случае изображение линий электрических векторов будет соответствовать рис. 3.

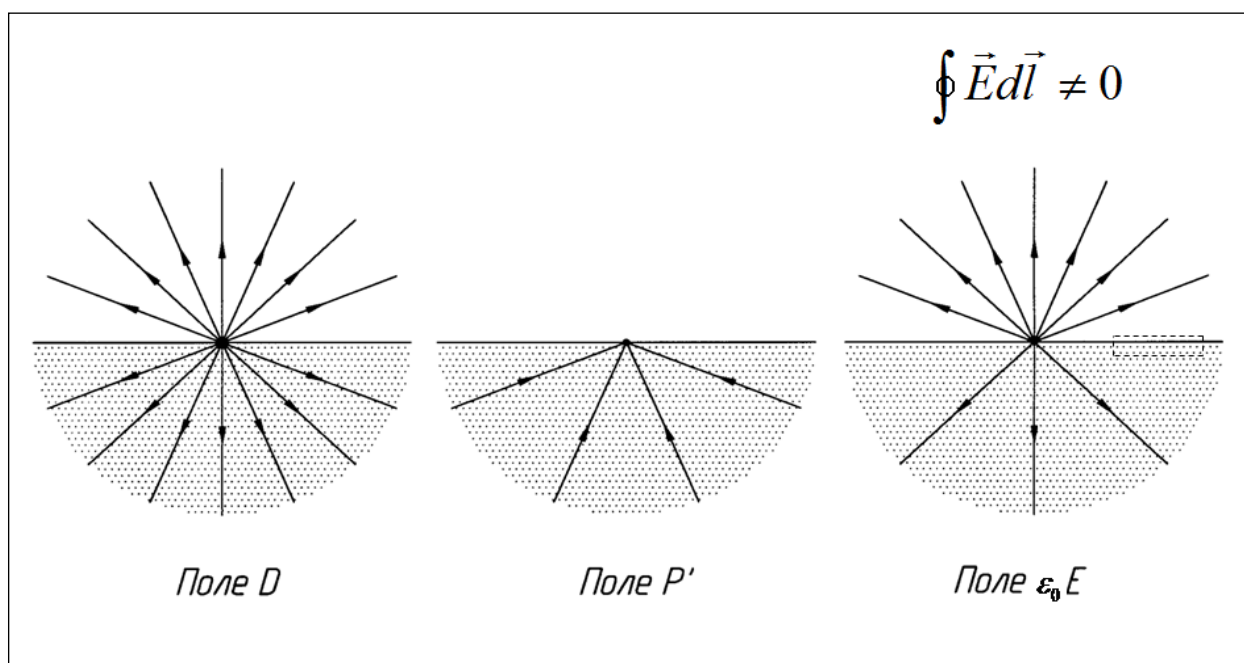


Рис. 3. Альтернативное изображение линий электрического поля, выполненное с учетом физических свойств векторов $\mathbf{D}$, $\mathbf{P}$ и $\mathbf{E}$

Возражение, которое выдвигают противники признания верности изображения по рис. 3, основано на невозможности, по их мнению, ненулевого значения циркуляции вектора $\mathbf{E}$ в выделенном контуре, построенному на границе раздела двух сред. Однако данное возражение опровергает рис. 4. На этом рисунке выделенный контур, построенный на боковой поверхности диэлектрика заряженного конденсатора, явно обладает таким свойством.

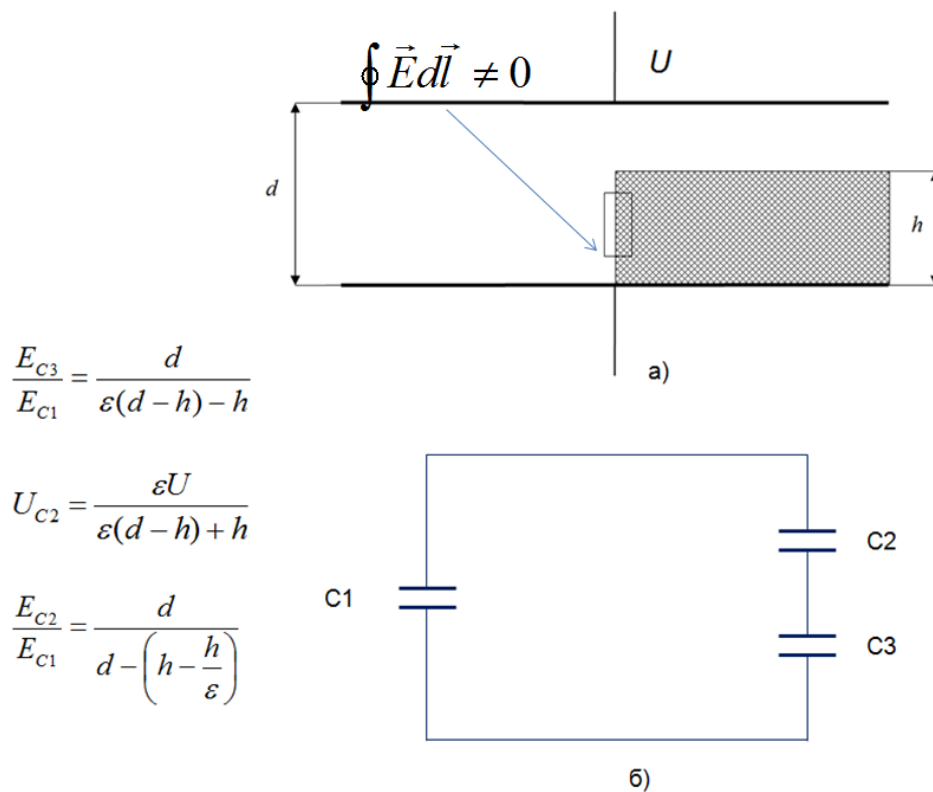


Рис. 4. Конденсатор с неоднородным диэлектриком (а) и его эквивалентная схема (б)

Внутри заряженного конденсатора с неоднородным диэлектриком обязательно будут разные значения вектора $\mathbf{E}$, что убедительно показывают формулы, приводимые на рисунке. Вполне очевидно, что по этой причине не будет равна нулю циркуляция вектора $\mathbf{E}$ по выделенному контуру, взятому вдоль боковой поверхности диэлектрика, хотя это и противоречит классическим представлениям о поведении этого вектора на границе двух сред.

Можно выдвинуть предположение против верности рис. 4, предполагая разницу в поверхностной плотности зарядов на внутренней поверхности пластин конденсатора. Но это как раз тот путь размышлений, на который мы должны стремиться выводить студентов в процессе обучения.

Продолжим анализировать парадоксальное изображение по рис. 3. Если признать поле $\mathbf{D}$ «не чувствующим» неоднородностей диэлектрической среды, то есть не деформируемым при переходах из одной среды в другую, как это изображено на рис. 3, то придется признать ошибочность известных изображений поля $\mathbf{D}$ со сгущениями линий поля внутри диэлектриков. Это касается изображений поля $\mathbf{D}$ внутри шарообразных диэлектриков и плоских пластин при пересечении их под углом к нормали. Такие изображения встречаются в книгах и учебниках по электромагнетизму со времен Зоммерфельда и до наших дней [10-14]. На рис. 5 приведено изображение линий $\mathbf{D}$ (смещение) и $\mathbf{E}$ (напряженность) из учебника Калашникова [14].

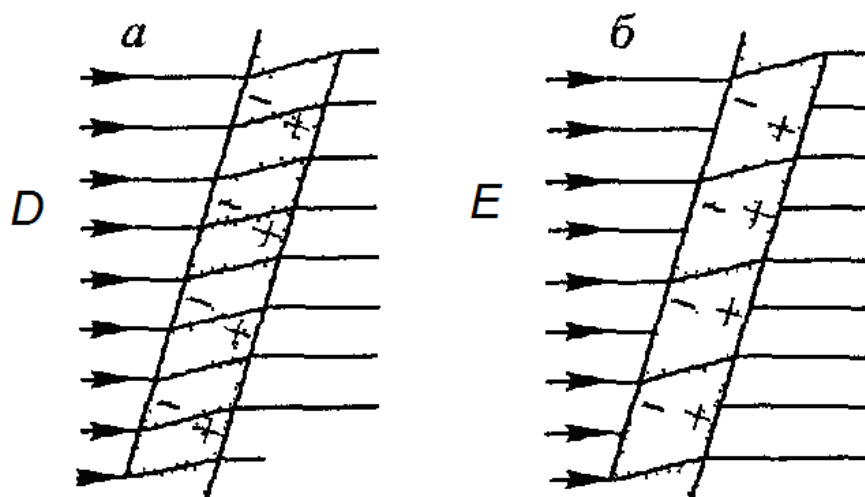


Рис. 5. Линии поля электрического смещения (а) и напряженности (б) в пластине диэлектрика

Отвергая возможность усиления поля $\mathbf{D}$ внутри диэлектриков, неизбежно придется признать ошибкой и заблуждением современные широко распространенные представления о преломлении вектора $\mathbf{D}$ на любой границе двух диэлектрических сред. Однако это оказывается настолько непривычным и удивительным свойством вектора $\mathbf{D}$, что не зря он попал в разряд «вспомогательных и не имеющих какого-либо глубокого физического смысла» [10]. Ну а если этот вектор не имеет какого-либо физического смысла, то с ним делают все, что хотят.

На рис. 6 приведено парадоксальное изображение линий этого вектора внутри наэлектризованного шара (электрета). Внутри шара линии двух векторов $\mathbf{D}$ и $\mathbf{E}$ направлены противоположно друг другу [10]. Возникает недоуменный вопрос – как такое возможно и что тогда будет представлять собой циркуляция вектора $\mathbf{D}$?

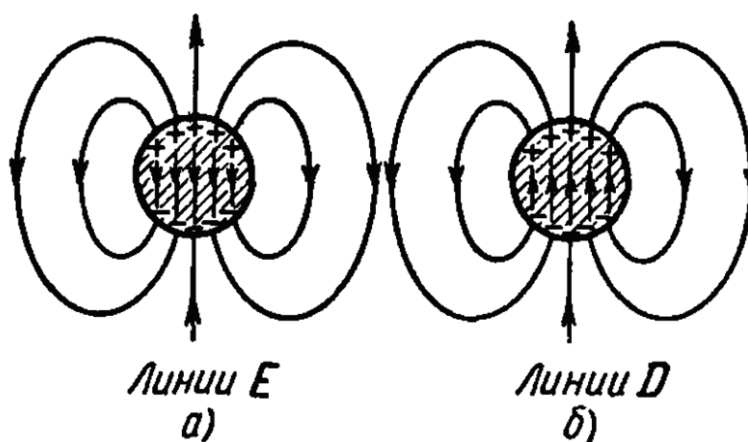


Рис. 6. Парадоксальное изображение линий вектора $\mathbf{D}$ внутри наэлектризованного шара

Рассмотрим еще один парадокс, связанный с электрическим полем касающийся угла преломления электрических векторов. Общеизвестно, что в электромагнитной волне вектор $\mathbf{E}$ перпендикулярен направлению распространения волны и это считается верным для любой среды. Однако в теории есть два противоречащих друг другу закона. Один закон - о соотношении углов падения и преломления светового луча (закон синусов или закон Снеллиуса). Другой закон описывает соотношение углов преломления для вектора $\mathbf{E}$ электромагнитной волны (закон тангенсов). Логическая нестыковка этих двух законов при условии ортогональности вектора $\mathbf{E}$ направлению распространения волны становится очевидной. Данный пример изображен на рис. 7.

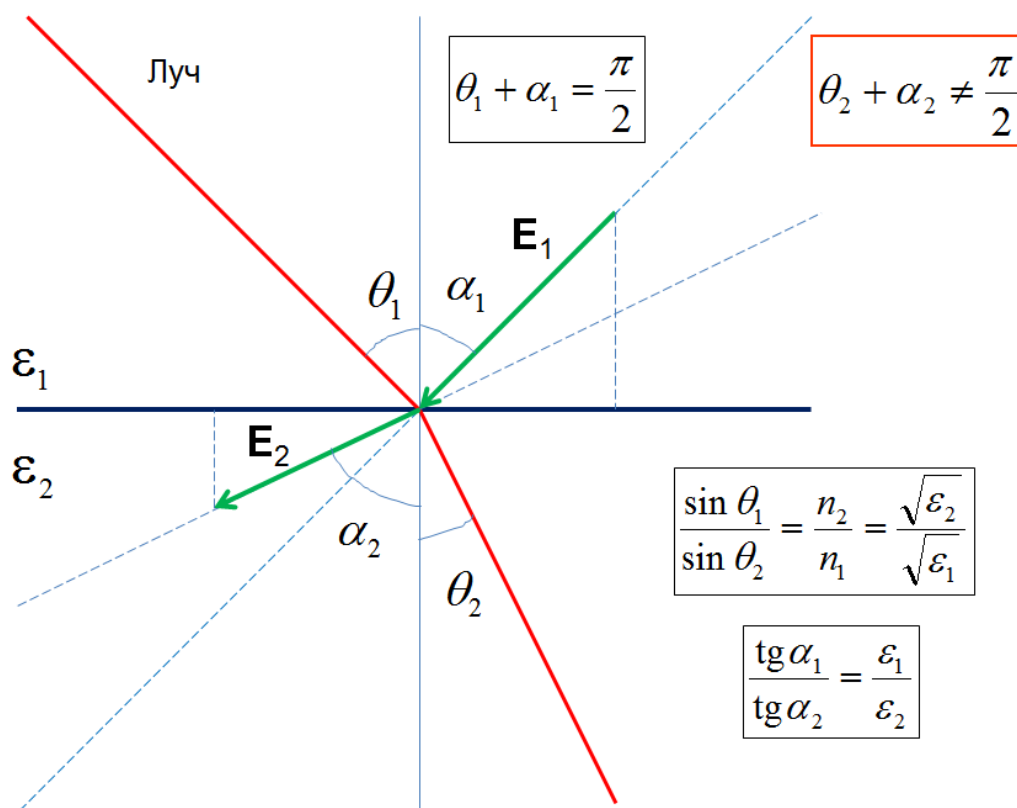


Рис. 7. Соотношение углов падения и преломления на границе двух сред для светового луча и для вектора $\mathbf{E}$

Очевидно, что при условии ортогональности вектора $\mathbf{E}$ направлению распространения луча, для угла падения θ_1 верно соотношение $\theta_1 + \alpha_1 = \pi/2$, а для угла преломления θ_2 верно соотношение $\theta_2 + \alpha_2 = \pi/2$. Тогда обе формулы, приводимые на рис. 7 одновременно не могут быть верными. Получается, что один из выше названных законов неверен. Возможным разрешением данного парадокса является авторская модель поведения электрических векторов, представленная на рис. 8.

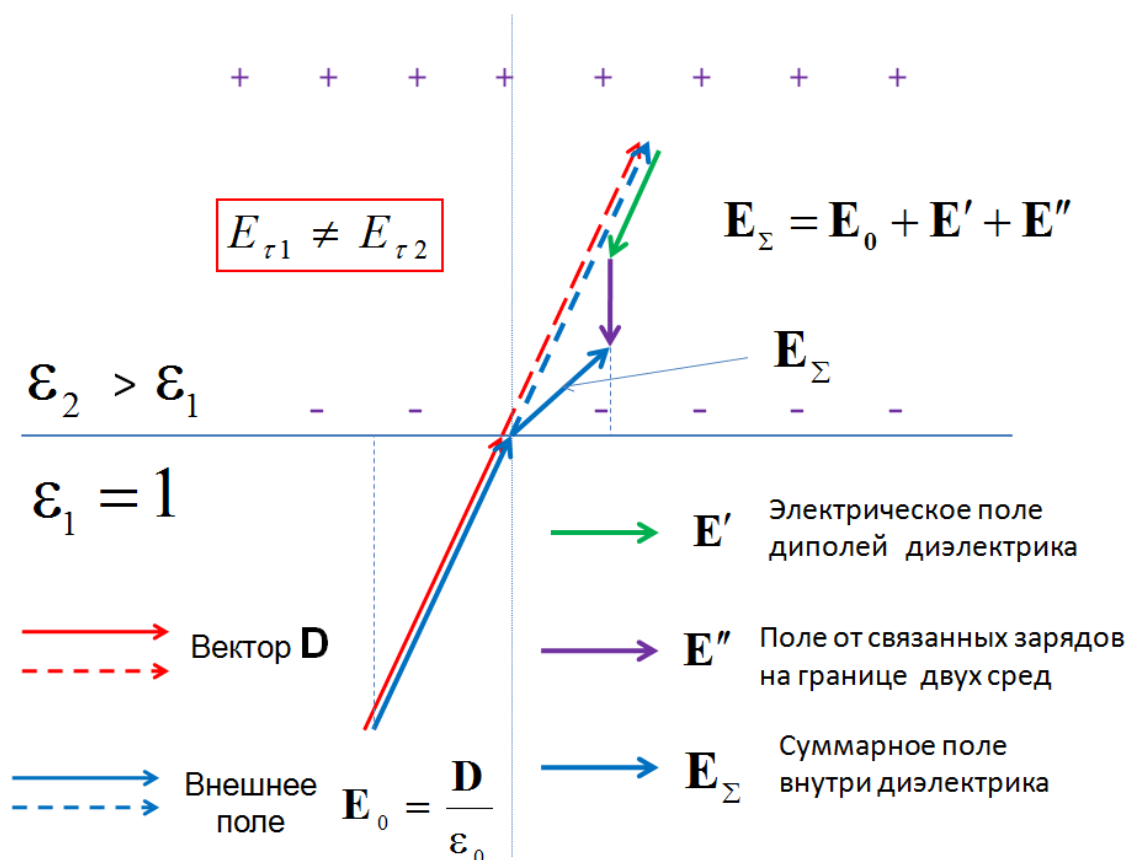


Рис. 8. Модель поведения электрических векторов на границе двух сред

По модели рис. 8 поворот вектора $\mathbf{E}$ при его преломлении на границе двух сред обеспечивает только одна составляющая. Данная составляющая перпендикулярна границе двух сред и определяется она величиной связанных зарядов, образующихся на границе двух сред под действием внешнего поля. Адекватность модели подтверждает практика - за счет выбора формы поверхности соприкасающихся сред производится фокусировка лучей света и других типов волн.

Для того чтобы побуждать студентов к самостоятельному изучению физических парадоксов автор использует составление и обнародование специального списка тем, в которых, как правило, обнаруживаются парадоксы. Темы предлагаются как возможные для проработки и написания студентами научных статей. Текущий список тем, размещенных на персональной страничке автора [15], включает в себя более 20 наименований.

Часть парадоксов электростатики рассмотрена в недавней публикации автора [16].

Список литературы

1. Терлецкий Я.П. Парадоксы теории относительности. М.: Наука. 1966. 120 с.

2. Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров. Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/299700.html> (дата обращения 2.02.2012).
3. Чуев А.С., Задорожный Н.А. Компьютерный практикум по изучению системы электромагнитных величин и их закономерностей. // Физическое образование в вузах. 2013. №1. С. 98-104.
4. Коган И.Ш. Физические величины и понятия (обобщение и систематизация). Режим доступа: <http://www.physicalsystems.org/index.html> (дата обращения 15.07.2014).
5. Бессонов Е.А. Трехмерная система физических величин СИ. // Законодательная и прикладная метрология. М.: АНО «РСК-Консалтинг». 2015. № 2. С. 22-33.
6. Ермолаев Д.С. Обобщенные законы физики или физика для начинающих. // SciTecLibrary. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/4959.html> (дата обращения 15.07.2014).
7. Роберт Орос ди Бартини. Соотношение между физическими величинами. // Сб. ст.: Проблемы теории гравитаций и элементарных частиц. Под редакцией К.П. Станюковича и Г.А. Соколика. М.: Атомиздат. 1966. вып.1. С. 249-266.
8. Спурре А.Ф. Парадоксы физики. // SciTecLibrary. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7113.html> (дата обращения 15.07.2014).
9. Сопов Ю.В. Тепловая энергия. Что в ней ложь и где правда? // SciTecLibrary. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/13487.html> (дата обращения 15.07.2014).
10. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 4-е испр. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2003. 320 с.
11. Зоммерфельд А. Электродинамика. М.: Изд-во иностранной литературы. 1958. 505 с.
12. Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле: учебное пособие для втузов. (Серия: Физика в техническом университете). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. 422 с.
13. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов. 5-е изд. В 5 т. Т. 2.: Электричество и магнетизм. М.: Лань. 2011. 352 с.
14. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит. 2003. 624 с.
15. Персональная страничка автора. // Сайт МГТУ им. Н.Э. Баумана. Режим доступа: <http://www.bmstu.ru/ps/~chuev/> (дата обращения 15.07.2014).
16. Чуев А.С. О новых подходах в описании стационарного электрического поля внутри диэлектрических сред и на границе их раздела. // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2014. вып. 6 (30). 14 с. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1325.html> (дата обращения 20.11.2014).