

Стасенко Альберт Леонидович
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики Факультета аэромеханики и летательной техники Московского физико-технического института(МФТИ), член редколлегии журнала «Квант».

Рассмотрено воздействие пространственно неоднородных электрического и магнитного полей (с изменяющейся от точки к точке «густотой» силовых линий) на соответствующие диполи. Показано, что даже электрически нейтральное или ненамагниченное вещество втягивается в область более сильного поля или выталкивается из неё, что открывает возможность разделения компонентов смесей веществ.

У края конденсатора или соленоида

«… Не ложися на краю!..» (Известная рекомендация)

Нет, не напрасно в этих словах заботливые мамы ещё в колыбели предупреждают будущих отличников. Край – всегда что-то опасно манящее.

1. У края конденсатора. Взять хотя бы плоский конденсатор. Все знают, что электрическое поле внутри плоского конденсатора однородно и его напряжённость равна $E = V/d$, где d – расстояние между обкладками (рис.1). Но это вдали от его краёв, а край всегда есть. (Область, где поле E приблизительно однородно, обведена пунктиром на рис. 1).

А что творится у края конденсатора?

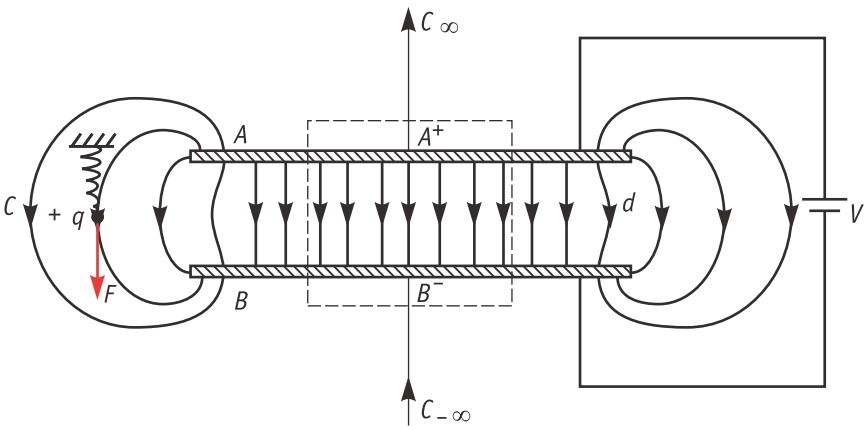


Рис. 1



Силовые линии $\vec{E}$ искривляются внутри, – это ещё можно стерпеть, – но что это? – электрическое поле есть и снаружи, да и заряды, оказывается, «вылезли» на внешнюю поверхность пластин!? (Каждая силовая линия поля $\vec{E}$ начинается на положительных и оканчивается на отрицательных зарядах.) Понятно, что так и должно быть: ведь работа поля по перемещению любого заряда q по замкнутому контуру (например, ABCA) должна равняться нулю – это свойство потенциального поля. Значит, если на участке AB эта работа положительна, то на участке BCA она должна быть отрицательна. А так как длина участка BCA

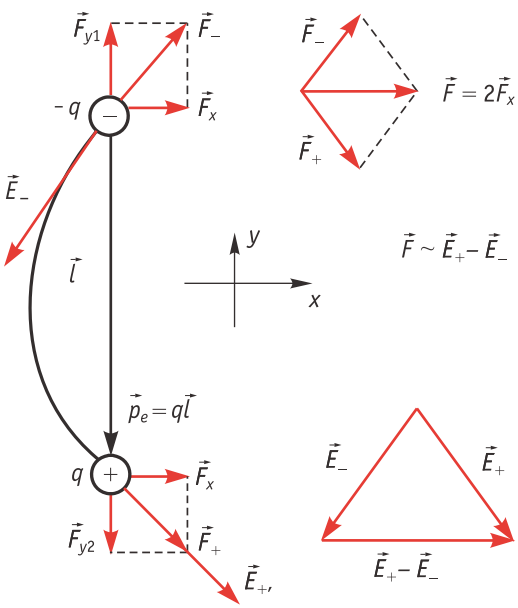


Рис. 2

гораздо больше, чем AB, то на нём поле E в среднем должно быть слабее, чем на AB. В частности, вдоль оси симметрии – линии $C_{-\infty}B^-A^+C_{\infty}$ (замкнутой на бесконечности) среднее значение напряжённости поля должно стремиться к нулю, так как длина внешнего участка пути бесконечно велика, а вот работа вдоль этого внешнего участка вовсе не нуль, а равна в точности $-qV$.

Но как же измерить это поле? Можно, конечно, в любую исследуемую точку подвесить на пружинке небольшой шарик, несущий известный положительный заряд, и посмотреть, на сколько пружинка растянулась. Измерив силу $\vec{F}$, можно написать $\vec{E} = \vec{F}/q$, – по определению. А можно воспользоваться и другим прибором, например, гигрометром (который измеряет влажность воздуха!). Это удивительно, но в принципе – возможно. Дело в том, что молекулы воды сильно полярны. Каждая из них представляет собой маленький электрический диполь – он изображён на рис.2 в виде отрезка длиной l. Кроме того, для простоты расположим его вместо шарика на пружине прямо у средней плоскости конденсатора (проходящей на равном расстоянии от пластин), на которой поле $\vec{E}$ строго перпендикулярно пластинам. Но хотя размер этого диполя и маленький, а всё-таки не нулевой. Чтобы «рассмотреть» его, мы увеличили картинку на рис.2. Теперь видно, что из-за искривления силовой линии поля силы $\vec{F}_-$ и $\vec{F}_+$, действующие на отрицательный и положительный заряды, слегка наклонены по отношению к средней плоскости. Значит, существуют не только их составляющие $\vec{F}_{y1}$ и $\vec{F}_{y2}$, перпендикулярные пластинам (стремящиеся разорвать диполь), но и компоненты $\vec{F}_x$, параллельные пластинам, – и они направлены в сторону конденсатора!

На рис.2 справа показаны соответствующие векторы. Видно, что результирующая сила $\vec{F}$, направленная вдоль оси x,

пропорциональна разности векторов $\vec{E}_+$ и $\vec{E}_-$ в тех точках, где расположены полюсы (заряды) диполя.

Тут стоит удивиться: сила, втягивающая диполь в конденсатор, *перпендикулярна* локальному направлению электрического поля в центре диполя. Причём, поскольку эта сила стремится к нулю в середине конденсатора (по условию симметрии) и на больших расстояниях от него, то она должна достигать где-то своего максимального значения.

Итак, молекулы воды, как и всякий диполь, будут втягиваться в конденсатор. До каких же пор? – пока рост их концентрации не будет уравновешен другим процессом – диффузией, то есть перемещением вещества в область меньшей концентрации. Таким образом, в этом динамически равновесном состоянии концентрация молекул воды будет монотонно расти при перемещении от «бесконечности» к середине конденсатора. Тут-то и пригодится гигрометр. Более того, если вне конденсатора водяные пары насыщены, то внутри они станут пересыщенными и, как знать, – не начнётся ли конденсация пара в электрическом конденсаторе?

Конечно, под гигрометром здесь надо понимать не то громоздкое устройство, которое висит на стенке. Это прибор, который может измерять концентрацию паров воды на базе любого физического явления. Можно, например, использовать оптические методы – ведь каждое вещество, в том числе и вода, обладает своим спектром поглощения а, значит, и излучения.

2. У края соленоида. А теперь можно поговорить и о магнитном поле. Его «хранителем» является соленоид (рис.3). И опять-таки, если он достаточно длинный, магнитное поле внутри, вдали от его концов, будет почти однородно. А вот на его концах наблюдаются краевые эффекты – здесь поле неоднородно. Чем бы его измерить? В отличие от электрического поля, порождаемого зарядами, источников магнитного поля не существует: его силовые линии всегда замкнуты и нигде не пересекают друг друга и даже не касаются друг друга. Значит, для его зондирования можно использовать маленький магнитик. На рис.3*а* и рис. 3*б* слева нарисованы такие магнитики. А чтобы показать принципиальное отличие так называемого магнитного диполя от электрического, нарисованы два магнитика, обладающие двумя «полюсами». На рис. 3*а* линии магнитной индукции $\vec{B}$ выходят из точки N (северный полюс) и входят в точку S (южный полюс): это неточный рисунок. А вот рис. 3*б* более правильный: этот магнитик похож на маленький соленоид, все линии поля $\vec{B}$

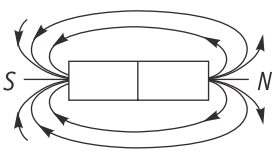


Рис. 3*а*

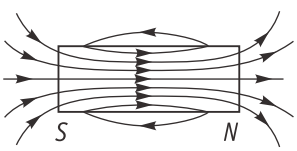


Рис. 3*б*

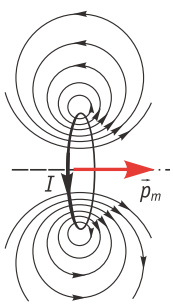


Рис. 3*в*

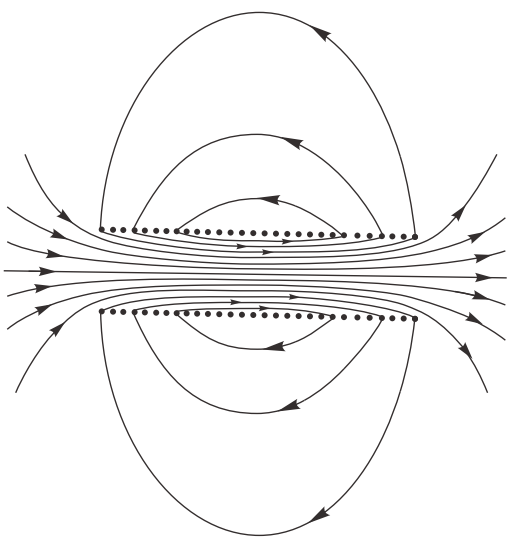


Рис. 3

замкнуты и не исходят из какой-либо точки и не приходят в точку, чем подчёркивается принципиальное отличие магнитного диполя от электрического. Так что лучше уж изобразить магнитный диполь в виде кольца с током (рис.3*в*). Тут видно, что все линии магнитной индукции $\vec{B}$ охватывают токовое кольцо, нигде не прикасаясь к нему и друг к другу.

Поместим магнитный диполь в виде кольца с током на оси соленоида вблизи его конца, где магнитное поле соленоида неоднородно. Давайте увеличим картинку (рис.4). Тут два кружочка обозначают направление электрического тока: кружок с точкой – на нас, с крестиком – от нас. И показано также, что линии магнитной индукции *B* наклонены к оси соленоида. Значит, силы Ампера F_A, действующие на верхний и нижний элементы кольца, тоже наклонены к оси. Их можно разложить на компоненты F_y (стремящиеся разорвать кольцо) и F_x, которые (опять-таки!) направлены к середине соленоида. Значит, магнитный диполь будет втягиваться внутрь, если его *магнитный момент* $\vec{p}_m$ направлен вдоль линий магнитной индукции.

Но пора вспомнить о том, что магнитные вещества бывают разные. Например, *парамагнетики*, попав в магнитное поле, приобретают магнитный момент $\vec{p}_m$, направленный вдоль $\vec{B}$, – именно так и предполагалось на рис. 3. (Этот магнитный момент аналогичен электрическому моменту $\vec{p}_e = q\vec{l}$. А *диамагнетики*, наоборот, приобретают момент $\vec{p}_m \sim \left(-\vec{B}\right)$, противоположный направлению $\vec{B}$. Значит, согласно сказанному выше, они должны выталкиваться из соленоида.

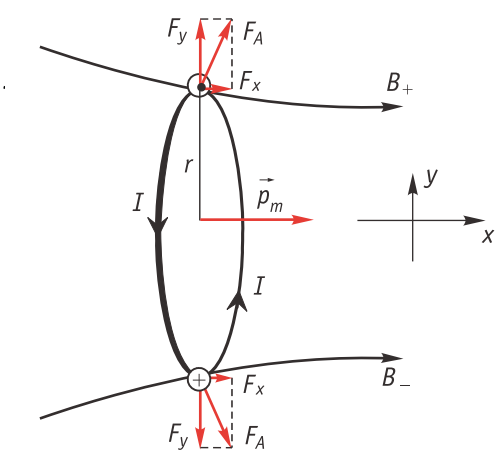


Рис. 4

Если говорить о воздухе, то его газы ведут себя по-разному по отношению к магнитному полю: кислород является парамагнетиком, азот – диамагнетиком. А те же водяные пары, которые втягивались в конденсатор, будучи диамагнетиками, будут выталкиваться из соленоида. Значит, в нём атмосфера будет более сухой и насыщенной кислородом, чем снаружи.

3. Приложения для тех, кто хочет кое-что уточнить.

а). Построим цилиндр, соосный соленоиду (рис.5). Его длина пусть будет равна малой величине Δx, радиус *r*. Воспользуемся тем фундаментальным фактом, что лини поля $\vec{B}$ нигде не возникают и не исчезают. Значит, сколько линий вошло в левую крышку этого цилиндра и через боковую кольцевую часть, столько же должно выйти через правую. Иначе говоря, поток вектора магнитного поля через площадку πr^2 в сечении $x + \Delta x$ должен быть равен сумме потоков через такую же площадку πr^2 в сечении *x* и через кольцевую часть площадью $2\pi r \Delta x$. Но потоки создаются только компонентами, перпендикулярными площадкам. Это похоже на расход воды в реке или кране: чтобы найти его, нужно умножить скорость на площадь *перпендикулярного* сечения. Расход измеряется в $м^3/с$.



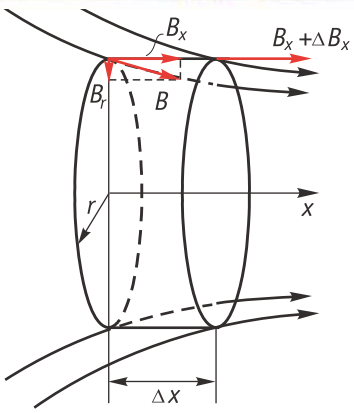


Рис. 5

Итак, запишем

$$\pi r^2 \left(B_x + \Delta B_x\right) = \pi r^2 B_x + 2\pi r \Delta x B_r,$$

откуда

$$B_r = \frac{\Delta B_x}{\Delta x} \cdot \frac{r}{2}.$$

Нас интересует именно радиальная компонента магнитного поля B_r, ибо только она и создаёт осевую силу, действующую на ток I, текущий по кольцу радиуса r. Согласно закону Ампера, эта сила будет равна $F_x = 2\pi r\, I B_r$ (тут сами индексы показывают, что всё взаимно перпендикулярно). Подставляя сюда выражение для B_r, получим

$$F_x = 2\pi r\, I \frac{\Delta B_x}{\Delta x} \cdot \frac{r}{2} = \pi r^2\, I \cdot \frac{\Delta B_x}{\Delta x} = p_m \cdot \frac{\Delta B_x}{\Delta x}.$$

В этом выражении введено обозначение $p_m = \pi r^2 I$. Эта величина называется магнитным моментом витка с током. Таким образом, втягивающая сила пропорциональна величине магнитного момента и «быстроте» изменения с расстоянием индукции магнитного поля.

Аналогичное выражение можно получить для случая электрического диполя с дипольным моментом $p_e = gl$ в пространственно неоднородном электростатическом поле.

б). Но как не сделать численных оценок! Воспользуемся справочниками.

Электрический дипольный момент воды равен $p_e = 6{,}2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Следовательно, «плечо» такого диполя равно

$$l = \frac{p_e}{e} = \frac{6{,}2 \cdot 10^{-30}\,\text{Кл}\cdot\text{м}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{Кл}} \approx 4 \cdot 10^{-11}\,\text{м} = 0{,}4\ \text{Å}.$$

Таким образом, «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов раздвинуты на расстояние, почти на порядок меньшее диаметра молекулы воды (около 3 Å).

А магнитные моменты? Как уже было сказано, основные компоненты воздуха по-разному ведут себя в магнитном поле. Например, так называемая магнитная восприимчивость для азота равна – 0,49, а для кислорода + 139 (в некоторых условных единицах). Это значит, что один из газов будет выталкиваться из соленоида, а другой – почти в триста раз сильнее втягиваться в него.

4. Итак, мы видим, что можно разделять вещества при помощи электрического и магнитного полей. Не построить ли на этой основе кислородный цех? Впрочем, на основе любого физического явления можно построить полезную технологию.

И теперь, когда нам ясны краевые эффекты, можно согласиться с возражением убаюкиваемого младенца: «Ну, а я ложуся с краю и спокойно засыпаю!».