Конденсатор в коробке и потенциальность кулоновского поля

Е.РОМИШЕВСКИЙ

— Как вы считаете, кто задает больше всех вопросов?
— Наверное, ребенок?
— Нет, это физик! Да к тому же еще и сам старается на них ответить.

Интервью с прохожим

Рассмотрим некоторые интересные физические примеры и опыты, связанные с постоянным электрическим полем. Возьмем плоский конденсатор, т.е. две параллельные тонкие металлические пластины площадью S, расстояние между которыми d существенно меньше размеров этих пластин. Как можно зарядить такой конденсатор? Какой минимальный заряд для этого потребуется?

Поместим, например, на левую пластину положительный заряд $+Q_0$, а на правую — такой же по величине отрицательный заряд $-Q_0$. Эти заряды почти равномерно распределятся по внутренним сторонам пластин, с поверхностной плотностью $\sigma_0 = Q_0/S$, и создадут между пластинами однородное электрическое поле напряженностью

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{Q_0}{\varepsilon_0 S}.$$

В результате между пластинами возникнет разность потенциалов

$$U_0 = E_0 d = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} d = \frac{Q_0}{\varepsilon_0 S/d} = \frac{Q_0}{C},$$

где $C = \varepsilon_0 S/d$ — емкость плоского конденсатора.

Конденсатор — это хранитель зарядов. И емкость конденсатора определяет, насколько высока разность потенциалов между его обкладками (пластинами), когда мы храним в нем заряд, обуславливающий эту разность потенциалов. Если емкость велика, то даже при большом заряде разность потенциалов мала, и мы можем «загрузить» еще больший заряд, не боясь, что при больших значениях разности потенциалов, а значит, и напряженности поля возникнет пробой и конденсатор потеряет свой заряд и свою энергию.

Мы можем зарядить конденсатор по-другому, поместив положительный заряд $+Q_0$, например, на левую (положительную) пластину, а правую просто заземлить. При этом отрицательный заряд $-Q_0$ сам придет из земли, и между пластинами возникнет та же разность потенциалов U_0. Можно подключить к незаряженным пластинам батарею с электродвижущей силой $\mathcal{E}_б = U_0$, тогда через батарею пройдет заряд Q_0 и конденсатор зарядится. Мы можем сказать, что для зарядки конденсатора емкостью $C = \varepsilon_0 S/d$ до разности потенциалов U_0 ему достаточно сообщить заряд Q_0.

Разместим теперь слева и справа от нашего заряженного плоского конденсатора — пластины *2* и *3* — еще две протяженные параллельные пластины

1 и *4* тоже на расстояниях d от пластин конденсатора (рис.1) и соединим их проводником. Иными словами, как бы поместим наш конденсатор в металлическую коробку. Спрашивается, какой

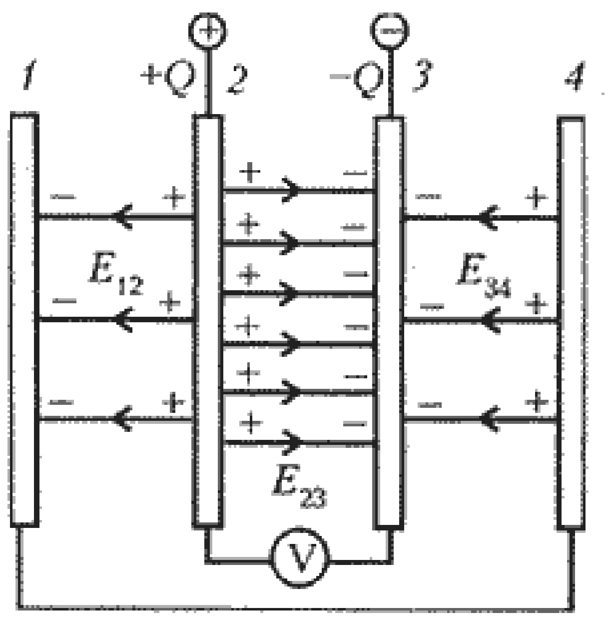

Рис. 1

теперь будет картина распределения зарядов на пластинах и электрических полей между пластинами и изменится ли емкость конденсатора с выводами от пластин *2* и *3*, если раньше она была равна $C = \varepsilon_0 S/d$?

Сначала подсоединим вольтметр, конечно идеальный (это значит, что его омическое сопротивление бесконечно большое, а электроемкость бесконечно малая), к «свободным» пластинам *2* и *3*, т.е. без пластин *1* и *4*. Вольтметр, разумеется, покажет разность потенциалов U_0. Потом, не меняя заряд Q_0, подсоединим вольтметр к пластинам *2* и *3*, находящимся внутри соединенных пластин *1* и *4*. Может показаться удивительным, что, хотя пластины *1* и *4* и не заряжены, показание вольтметра изменится, причем значительно. Вольтметр покажет теперь разность потенциалов $U = 2U_0/3$. Это значит, что емкость такого сложного конденсатора изменилась и стала равной

$$C^* = \frac{Q_0}{2U_0/3} = \frac{3}{2}\frac{Q_0}{U_0} = \frac{3}{2}C,$$

т.е. увеличилась в 3/2 раза. Итак, сажая на пластины *2* и *3* заряды $+Q_0$ и $-Q_0$, мы в последнем случае (в присутствии пластин *1* и *4*) получили разность потенциалов в 2/3 раза меньше, чем для свободного конденсатора с теми же пластинами. Это — экспериментальный факт, и мы его теперь должны осмыслить.

Если разность потенциалов между пластинами *2* и *3* равна

$$U = Ed = \frac{2}{3}U_0 = \frac{2}{3}E_0 d = \frac{2}{3}\frac{Q_0 d}{S\varepsilon_0} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_0 d}{\varepsilon_0},$$

то это значит, что на правой стороне пластины *2* находится заряд $+2Q_0/3$, а на левой стороне пластины *3* — заряд $-2Q_0/3$. А куда же делся заряд $+Q_0/3$ пластины *2*? Он может быть только на левой стороне пластины *2*! Но тогда на правой стороне пластины *1* должен находиться соответствующий отрицательный заряд $-Q_0/3$. Опять вопрос: а откуда взялся этот заряд на первой пластине? Ответ: только если он перетек с пластины *4*, так что на ее левой стороне появился заряд $+Q_0/3$. В результате между пластинами *1* и *2*, а также *3* и *4* возникли одинаковые электрические поля: $\vec{E}_{12} = \vec{E}_{34}$, которые направлены противоположно полю $\vec{E}_{23}$ и в два раза меньше его по величине.

Анализируя экспериментальный факт (результаты показаний вольтметра в рассмотренных случаях), мы пришли к очень важному заключению, что если с некоторым пробным зарядом q пройти по замкнутому контуру от пластины *1* к пластине *4* внутри «сложного конденсатора» и вернуться к пластине *1* по проводнику, соединяющему эти пластины, то суммарная работа в электрических полях $\vec{E}_{12}$, $\vec{E}_{23}$ и $\vec{E}_{34}$ будет равна нулю:

$$A = qE_{12}d + qE_{34}d - qE_{23}d = 0.$$

Внутри объемов проводников, конечно, не содержится электрических полей. Дело в том, что кулоновское электрическое поле — поле стационарных электрических зарядов, подчиняющееся закону Кулона, — обладает очень важным и замечательным свойством (как и поле тяготения, подчиняющееся похожему закону тяготения Ньютона): оно *потенциально*, т.е. работа по перемещению электрического заряда в этом поле зависит только от положения начальной и конечной точек, но не от формы пути перехода между ними. Естественно, знаки работы при переходе в прямом и обратном направлениях разные, поэтому работа по *любому* замкнутому пути (любой формы) всегда будет равна нулю. Это означает, что любой точке пространства, в котором имеется электрическое кулоновское поле, можно приписать определенное значение потенциала φ, равного работе по перемещению единичного положительного заряда из этой точки пространства, где есть поле, в бесконечность, где поля уже нет, по пути любой формы.

Рассматривая нашу систему из четырех пластин, можно было бы исходить из этого замечательного принципа, свойственного кулоновскому полю. Тогда, вставляя между пластинами *1* и *4* заряженные зарядами $\pm Q_0$ пластины *2* и *3*, мы должны обязательно потребовать переход заряда $-Q_0/3$ с четвертой пластины на первую, иначе мы нарушим наш замечательный принцип, что невозможно!

А каков физический механизм перетекания заряда с пластины на пластину? На этот вопрос ответить несложно. В металле имеется огромное количество свободных электронов, имеющих столь малую массу, что они практически безынерционны, поэтому достаточно чрезвычайно малых электрических полей, чтобы вызвать их перемещение. Вот этими полями и являются «краевые поля» нашего плоского конденсатора в окружающем его пространстве.

Следует иметь в виду, что потенциальность электрического кулоновского

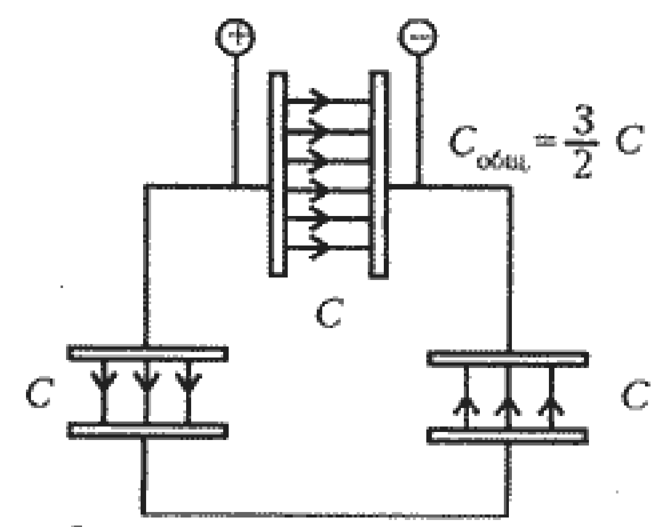

Рис. 2

поля — это не только замечательный принцип, но и способ анализа и решения многих вопросов и задач. К примеру, легко придумать и изобразить эквивалентную схему включения конденсаторов из наших четырех пластин (рис.2), имеющую общую емкость $3C/2$.

Вернемся опять к нашему плоскому конденсатору, имеющему уединенные пластины (*2* и *3*), с зарядом Q_0, емкостью $C = \varepsilon_0 S/d$ и разностью потенциалов U_0, и попробуем графически изобразить распределение потенциала его электрического поля вдоль оси, проходящей через середины пластин. Начало координат выберем в центре конденсатора, а ось X направим вправо (рис.3). Плоскость YZ, перпендикулярная оси X и проходящая через центр конденса-

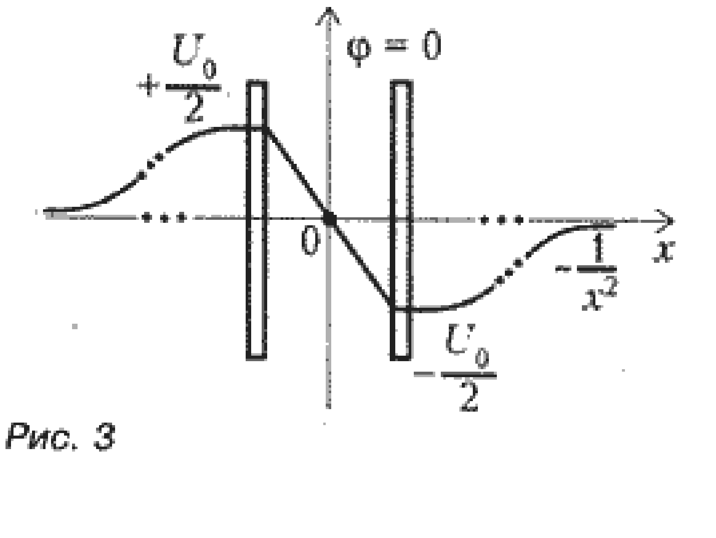

Рис. 3

тора, является эквипотенциальной поверхностью нулевого потенциала. В каждой ее точке силовые линии поля перпендикулярны к ней и работа по перемещению заряда вдоль этой поверхности на бесконечность равна нулю. Внутри конденсатора поле однородное, значит, график потенциала будет линейным, причем в центре потенциал равен нулю, а на поверхностях пластин составляет $+U_0/2$ и $-U_0/2$. Внутри металлических пластин поля нет и потенциал там постоянен ($\pm U_0/2$). Вне пластин электрическое поле очень мало, но на большом расстоянии от центра слева и справа потенциал стремится к нулю, уменьшаясь пропорционально $1/x^2$ (подумайте самостоятельно — почему).