

Проводники в электрическом поле

Темы кодификатора ЕГЭ: проводники в электрическом поле.

Если полюса батарейки замкнуть металлической проволокой, по ней пойдёт электрический ток. Заменяем проволоку стеклянной палочкой — никакого тока не возникнет. Металл является проводником, а стекло — диэлектриком.

Проводники отличаются от диэлектриков наличием *свободных зарядов* — заряженных частиц, положение которых не связано с какой-то точкой внутри вещества. Свободные заряды приходят в движение под действием электрического поля и могут перемещаться по всему объёму проводника.

Проводники — это в первую очередь металлы. В металлах свободными зарядами являются свободные электроны. Откуда они там берутся? Это особенность металлической связи. Дело в том, что валентный электрон, находящийся на внешней электронной оболочке атома металла, весьма слабо связан с атомом. При взаимодействии атомов металла их валентные электроны покидают свои оболочки, «отправляясь в путешествие» по всему пространству металла¹.

Проводниками являются также электролиты. Так называются растворы и расплавы, свободные заряды в которых возникают в результате диссоциации молекул на положительные и отрицательные ионы. Бросим, например, в стакан воды щепотку поваренной соли. Молекулы NaCl распадутся на ионы Na^+ и Cl^- . Под действием электрического поля эти ионы начнут упорядоченное движение, и возникнет электрический ток.

Природная вода, даже пресная, является проводником из-за растворённых в ней солей² (но, конечно, не таким хорошим, как металлы). Человеческое тело в основном состоит из воды, и в ней также растворены соли (хлориды натрия, калия, кальция, магния). Поэтому наше тело — проводник электрического тока.

Из-за наличия свободных зарядов, способных перемещаться по всему объёму, проводники обладают некоторыми характерными общими свойствами.

Поле внутри проводника

Первое общее свойство проводников в электростатическом поле состоит в том, что *напряжённость поля внутри проводника везде равна нулю*.

Докажем от противного, как в математике. Предположим, что в какой-то области проводника имеется электрическое поле. Тогда под действием этого поля свободные заряды проводника начнут направленное движение. Возникнет электрический ток — а это противоречит тому, что мы находимся в электростатике.

Конечно, такое рассуждение не оставляет ощущения удовлетворённости. Хотелось бы понять, *почему* обнуляется поле внутри проводника. Давайте попробуем.

Рассмотрим незаряженный проводящий шар, помещённый во внешнее электростатическое поле E . Для простоты считаем это поле однородным, но наши рассуждения останутся верными и в общем случае.

Под действием электрического поля E свободные электроны нашего шара скапливаются в левом его полушарии, которое заряжается отрицательно. Справа остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Возникновение этих зарядов, как вы помните, называется элек-

¹В узлах кристаллической решётки остаются положительные ионы. Казалось бы, они должны разлететься под действием кулоновских сил. Но нет — промежутки между ионами заполнены «газом» свободных электронов, который играет роль клея, держащего всю кристаллическую решётку

²Вот почему нельзя купаться в грозу!

тростатической индукцией: заряды на поверхности проводника индуцируются (т. е. наводятся) внешним электростатическим полем. Подчеркнём ещё раз, что происходит реальное разделение зарядов: если сейчас распилить шар по диаметру в вертикальной плоскости, то получатся два разноимённо заряженных полушария.

Индукцированные заряды создают своё поле E_i , направление которого внутри шара оказывается противоположным внешнему полю (рис. 1).

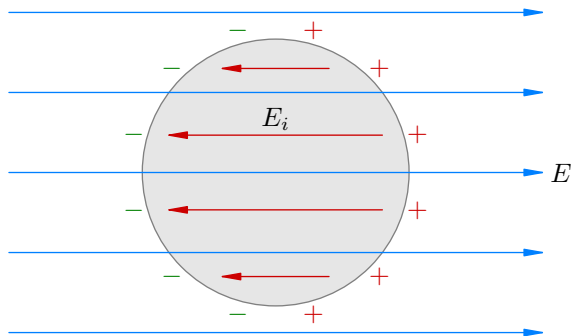


Рис. 1. $E_i = E$

Перестроение свободных зарядов шара продолжается до тех пор, пока поле E_i не компенсирует полностью внешнее поле E во всей области внутри шара. При наступлении этого момента (а наступает он почти мгновенно) результирующее поле внутри шара станет равным нулю, дальнейшее движение зарядов прекратится, и они окончательно займут свои фиксированные статические положения на поверхности шара.

А что будет в области снаружи шара? Поле E_i и тут наложится на внешнее поле E , искажая его тем сильнее, чем ближе к шару расположена точка наблюдения. На больших расстояниях от шара внешнее поле почти не изменится. В результате картина линий напряжённости будет иметь примерно следующий вид (рис. 2).

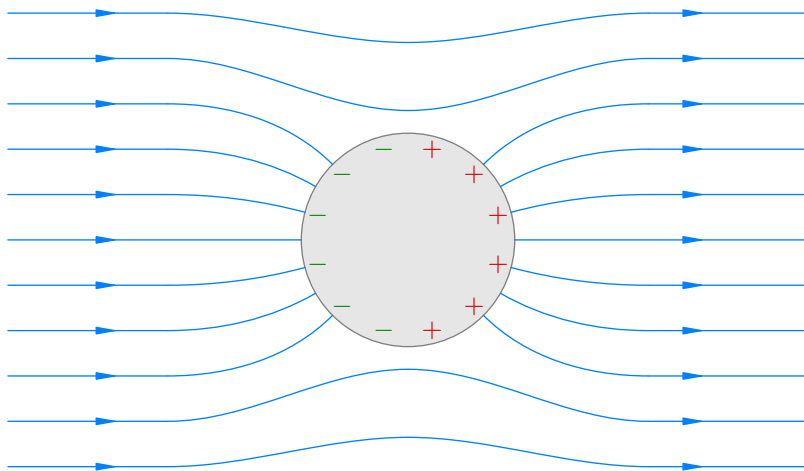


Рис. 2. Поле внутри проводника равно нулю

До сих пор наши рассуждения относились к случаю незаряженного проводника. Что изменится, если проводнику, помещённому в электростатическое поле, сообщить вдобавок некоторый заряд q ?

Легко понять, что результирующее поле внутри проводника всё равно окажется равным нулю. В самом деле, заряд q начнёт перераспределяться по поверхности проводника таким образом, что поле E_i этого заряда внутри проводника будет направлено *против* внешнего элек-

тростатического поля E . Перераспределение будет продолжаться до тех пор, пока оба поля E и E_i не компенсируют друг друга во всей внутренней области проводника.

Таким образом, *поле внутри проводника равно нулю вне зависимости от того, заряжен проводник или нет*. Любой проводник, помещённый в электростатическое поле, как бы «выталкивает» внешнее поле из своей внутренней области.

Заряд внутри проводника

Следующее общее свойство проводников состоит в том, что *объёмная плотность зарядов внутри проводника везде равна нулю*. Сформулируем это более подробно.

Какую бы область внутри проводника мы ни взяли, её суммарный заряд окажется равен нулю. Нескомпенсированные заряды, если они имеются, располагаются целиком на поверхности проводника.

Строгое доказательство этого утверждения опирается на фундаментальную теорему Гаусса, которую в школе не проходят. А неформальное объяснение очень простое: если бы внутри проводника имелись нескомпенсированные заряды, то они создавали бы там электрическое поле. Но электрического поля внутри проводника нет — стало быть, нет и зарядов.

Отсюда следует ещё один замечательный факт: *если внутри проводника имеется полость, то поле в этой полости равно нулю*. В самом деле, создадим внутри проводника полость, изъев часть вещества. Поле как было равно нулю до изъятия, так нулевым и останется — ведь заряд вынутого вещества равен нулю! Наши манипуляции не изменили ту статическую конфигурацию зарядов на поверхности проводника, которая создаёт нулевое поле во всех точках внутри проводника.

На явлении исчезновения поля в полости внутри проводника основана так называемая *электростатическая защита*. Если нужно уберечь от внешних электростатических полей какое-либо устройство, его помещают в металлический ящик (или окружают металлической сеткой), обнуляя напряжённость поля в пространстве вокруг устройства.

Поле вне проводника

Теперь рассмотрим область пространства, внешнюю по отношению к проводнику. Оказывается, *линии напряжённости электрического поля входят в проводник (или выходят из него) перпендикулярно поверхности проводника*.

Посмотрите ещё раз на рис. 2. Вы видите, что любая силовая линия, пересекающая шар, направлена точно под прямым углом к его поверхности.

Почему так получается? Давайте снова проведём доказательство от противного. Предположим, что в некоторой точке поверхности проводника силовая линия не перпендикулярна поверхности. Тогда в данной точке имеется составляющая вектора напряжённости, направленная *по касательной* к поверхности проводника — так называемая *касательная составляющая* вектора напряжённости. Под действием этой касательной составляющей возникнет электрический ток — а это противоречит тому, что мы находимся в электростатике.

Иными словами, заряды на поверхности проводника (при помещении проводника во внешнее поле или при сообщении проводнику заряда) перестраиваются до тех пор, пока линии напряжённости, уходящие в окружающее пространство, в каждой точке поверхности проводника не окажутся перпендикулярны этой поверхности (а внутри проводника не исчезнут вовсе).

Потенциал проводника

Раньше мы говорили о потенциале той или иной *точки* электростатического поля. Большой интерес представляют множества точек, потенциал которых одинаков. Один пример такого

множества мы знаем — это эквипотенциальные поверхности. Другим замечательным примером служит проводник.

Все точки проводника имеют одинаковый потенциал. Иными словами, разность потенциалов между любыми двумя точками проводника равна нулю.

В самом деле, если бы между какой-либо парой точек проводника существовала ненулевая разность потенциалов, возник бы ток от одной точки к другой — ведь в этом случае электрическое поле совершало бы ненулевую работу по перемещению зарядов между данными точками. Но в электростатике никакого тока быть не может.

Потенциал какой-либо (и тогда любой) точки проводника называется *потенциалом проводника*.

Как видим, проводник представляет собой «эквипотенциальный объём». В частности, поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью. Это даёт дополнительное объяснение утверждения предыдущего пункта — мы же знаем, что линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Напряжённость и потенциал поля проводящей сферы

Рассмотрим металлическую сферу радиуса R , которой сообщён заряд q . Нас интересуют напряжённость и потенциал электростатического поля, создаваемое сферой в каждой точке пространства.

Везде далее сферу можно заменить шаром — от этого ровным счётом ничего не изменится.

Начнём с напряжённости поля. Внутри сферы, как мы уже знаем, напряжённость поля равна нулю. Вне сферы напряжённость оказывается такой же, как если бы заряд q был точечным и находился в центре сферы. Итак:

$$E = \begin{cases} \frac{kq}{r^2}, & \text{если } r \geq R; \\ 0, & \text{если } r < R. \end{cases}$$

На рис. 3 показаны линии напряжённости поля положительно заряженной сферы и график зависимости модуля вектора напряжённости от расстояния до центра сферы.

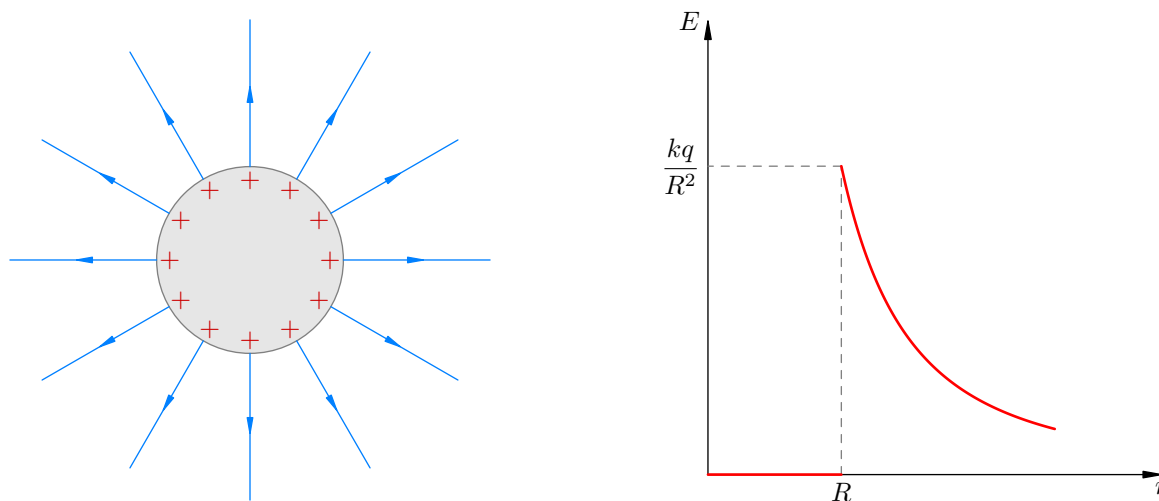


Рис. 3. Напряжённость поля заряженной сферы

Потенциал поля вне сферы равен потенциалу поля точечного заряда q , расположенного в центре сферы. Внутри сферы потенциал везде одинаков и совпадает с потенциалом точек

поверхности сферы:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{kq}{r}, & \text{если } r \geq R; \\ \frac{kq}{R}, & \text{если } r < R. \end{cases}$$

Вот как выглядит график зависимости потенциала положительно заряженной сферы от расстояния до её центра (рис. 4):

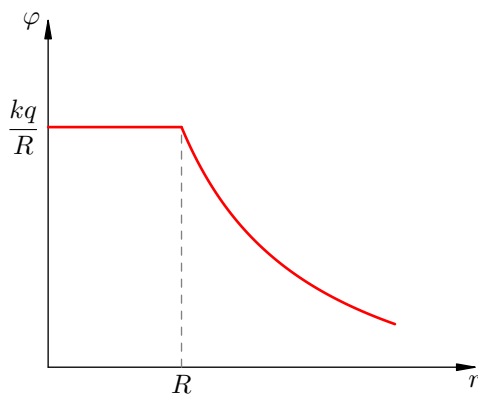


Рис. 4. Потенциал поля заряженной сферы