

31-32 Электростатическое поле в диэлектрике

1.7. Поляризация диэлектрика.

Вектор электрического смещения

Диэлектриками называют вещества, не проводящие электрического тока, в них практически отсутствуют свободные электрические заряды. Диэлектрики обладают связанными электрическими зарядами.

Свободные элементарные частицы (электроны или положительные и отрицательные ионы) под воздействием сил электрического поля могут свободно перемещаться в веществе, их перемещение не ограничивается внутримолекулярными силами.

Под *связанными* понимают электрические заряды, входящие в состав вещества и удерживаемые в определенных положениях внутримолекулярными силами. Сумма положительных связанных зарядов равна сумме отрицательных связанных зарядов. При отсутствии внешнего электрического поля диэлектрик в целом можно считать электрически нейтральным.

Если какое-либо диэлектрическое тело поместить в электрическое поле, оно поляризуется.

Под *поляризацией* понимают упорядоченное изменение расположения связанных зарядов внутри молекул, вызванное электрическим полем. Это изменение расположения проявляется в том, что положительные связанные заряды сместятся в сторону электрического поля, а отрицательные связанные заряды переместятся в противоположном направлении. Если напряженность электрического поля не чрезмерно велика, то частицы с положительными и отрицательными зарядами совершенно разойтись не могут, так как они удерживаются внутримолекулярными силами. В результате поляризации на поверхности вещества как бы обнажаются связанные заряды (рис. 1.4), где они не будут электрически нейтральны.

Связанные заряды при поляризации создают свое поле, напряженность которого \vec{E}' будет направлена противоположно напряженности \vec{E} внешнего поля. Поэтому напряженность результирующего поля в диэлектрике будет меньше напряженности внешнего поля.

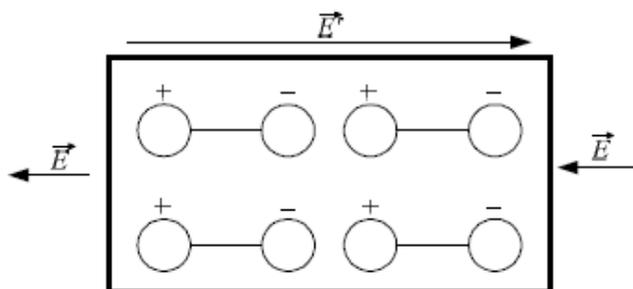


Рис. 1.4. Диэлектрик во внешнем электрическом поле

Степень поляризации диэлектрика характеризуется вектором поляризованности \vec{P} , который для однородных и изотропных диэлектриков пропорционален напряженности электрического поля в диэлектрике:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_r \vec{E}.$$

Безразмерная величина χ_r называется *относительной диэлектрической восприимчивостью*.

В некоторых случаях желательно иметь оценку действия зарядов, создающих электрическое поле, вне зависимости от свойств среды. Это достигается введением в расчеты вектора электрического смещения (электрической индукции) \vec{D} :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

Подставив выражение \vec{P} , получим

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_r \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} (1 + \chi_r).$$

Обозначим: $1 + \chi_r = \epsilon_r$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_a$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость. Окончательно имеем

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}. \quad (1.3)$$

В СИ $[D] = [P] =$ кулон на квадратный метр (Кл/м²).

Диэлектрическая восприимчивость χ_r диэлектриков – величина положительная, поэтому $\epsilon_r > 1$, а $\epsilon_a > \epsilon_0$.

1.8. Теорема Гаусса

Теорема Гаусса является одной из важнейших теорем электростатики. Она соответствует закону Кулона и принципу наложения. Теорему можно сформулировать и записать следующими способами.

1. Поток вектора электрического смещения через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов, находящихся в объеме, ограниченном этой поверхностью:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q_{\text{своб}}, \quad (1.4)$$

где $d\vec{S}$ – вектор элемента поверхности, длина которого численно равна поверхности элемента dS , а направление совпадает с направлением внешней нормали к этому же элементу (рис. 1.5).

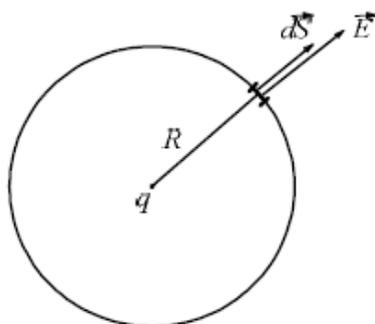


Рис. 1.5. Поток вектора напряженности сквозь замкнутую поверхность

Из уравнения (1.4) следует, что вектор \vec{D} является такой характеристикой поля, которая при прочих равных условиях не зависит от диэлектрических свойств среды (от величины ϵ_2).

2. Поскольку $\vec{D} = \epsilon_1 \vec{E}$, то теорему Гаусса для однородной и изотропной среды можно записать в такой форме:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q_{\text{своб}}}{\epsilon_a}, \quad (1.5)$$

т. е. поток вектора напряженности электрического поля сквозь любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов, находящихся в объеме, ограниченном этой поверхностью, разделенной на абсолютную диэлектрическую проницаемость среды ϵ_a .

Из уравнения (1.5) следует, что вектор \vec{E} представляет собой характеристику поля, которая в отличие от вектора \vec{D} при прочих равных условиях зависит от диэлектрических свойств среды (от величины ϵ_a), и электрическая напряженность E в диэлектрике слабее, чем в вакууме, при прочих равных условиях.

1.9. Электрическая прочность диэлектрика

Диэлектрик, разделяющий проводники с разными электрическими потенциалами (электроизоляция), находится в электрическом поле, и в каждой точке диэлектрика существует определенная напряженность этого поля. Если напряженность электрического поля превысит электрическую прочность диэлектрика, наступит разрушение диэлектрика, он будет пробит.

Напряженность электрического поля, при которой начинается пробой диэлектрика и нарушаются его изоляционные свойства, называют *пробивной напряженностью* или *электрической прочностью диэлектрика*, и обозначают $E_{\text{пр}}$. Эта величина для изоляционных материалов приводится в электротехнических справочниках.

Отношение электрической прочности диэлектрика к действительной напряженности поля называют запасом электрической прочности диэлектрика:

$$K = \frac{E_{\text{пр}}}{E}$$

Таким образом, изоляция проводников должна быть не только сконструирована, но и рассчитана на определенный запас электрической прочности. Действительную напряженность поля, созданного заряженными электродами определенной формы, можно определить с помощью теоремы Гаусса.

1.10. Проводник в электростатическом поле. Электростатическое экранирование

Проводящие вещества содержат большое количество свободных элементарных частиц, обладающих зарядом (электроны или положительные и отрицательные ионы). Под действием электрического поля эти частицы приходят в упорядоченное движение.

Если внести металлический проводник во внешнее электрическое поле, то под действием сил поля свободные электроны начнут перемещаться по проводнику против поля. На одной части поверхности проводника сосредоточатся отрицательные заряды, на противоположной – положительные (рис. 1.6).

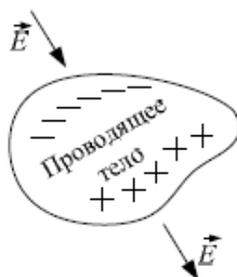


Рис. 1.6. Проводник в электростатическом поле

Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Перераспределение носителей зарядов происходит до тех пор, пока напряженность \vec{E} поля внутри проводника не станет равной нулю, а потенциал ϕ всех точек тела не станет одинаковым. Если допустить, что потенциалы точек тела различны, то под действием разности потенциалов начнется перемещение зарядов и пойдет ток, т. е. будет выделяться энергия в виде теплоты, что на практике не наблюдается.

Поверхность проводника будет эквипотенциальной поверхностью, а линии напряженности вне проводника перпендикулярны его поверхности.

Если проводнику сообщить электрический заряд, то под действием сил отталкивания элементы этого заряда будут перемещаться по проводнику и сосредотачиваться на его поверхности в слое, ко-

торый можно считать бесконечно тонким. Внутри заряженного проводника поле отсутствует.

Описанное свойство проводников используют в технике при электростатическом экранировании электрической аппаратуры. Экранируемый аппарат помещают в металлическую сетку-экран. В области, ограниченной этим экраном, электрического поля практически не будет.

1.11. Поле точечного заряда и поле заряженного шара

В качестве примера использования теоремы Гаусса найдем напряженность поля, создаваемую точечным зарядом q в точке, удаленной на расстоянии R от заряда. С этой целью проведем через заданную точку сферическую поверхность радиусом R , полагая, что заряд находится в центре сферы (см. рис. 1.5), и применим к этой сфере теорему Гаусса:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

В данном примере в каждой точке сферы векторы \vec{E} и $d\vec{S}$ совпадают по направлению. Угол между ними равен нулю. В силу симметрии числовое значение E во всех точках сферы одно и то же, поэтому поток вектора напряженности поля через сферическую поверхность S

$$ES = E4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где $4\pi R^2$ – площадь сферической поверхности S .

Следовательно, напряженность, создаваемая точечным зарядом q на расстоянии R от него,

$$E = \frac{q}{4\pi R^2 \epsilon_0}. \quad (1.6)$$

В соответствии с теоремой Гаусса напряженность поля заряженного шара имеет такое же выражение. Следовательно, заряд шара можно считать сосредоточенным в центре и рассматривать заряженный шар как точечное заряженное тело. В выражении (1.6) R – расстояние от центра шара до рассматриваемой точки поля.

Из выражения (1.6) видно, что наибольшая напряженность поля создается на поверхности заряженного шара.

Пример 1.2. Чему равен запас электрической прочности воздуха, окружающего заряженный шар, имеющий радиус $R = 1$ мм, если электрический заряд шара $q = 0,33 \cdot 10^{-10}$ Кл, пробивная напряженность воздуха $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6$ В/м, абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_a = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Решение. Напряженность электрического поля на поверхности шара по уравнению (1.6)

$$E = \frac{q}{4\pi R^2 \epsilon_a} = \frac{0,33 \cdot 10^{-10}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,3 \cdot 10^6 \text{ В/м.}$$

Запас электрической прочности

$$K = \frac{E_{\text{пр}}}{E} = \frac{3 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 10^6} = 10.$$

1.12. Поле заряженной оси

Рассмотрим электрическое поле заряженной оси с зарядом на единицу длины, равным τ .

Диэлектрическая проницаемость среды, окружающей ось, равна ϵ_a . Для нахождения напряженности поля в некоторой точке, удаленной на расстояние R от оси (рис. 1.7), проведем через эту точку цилиндрическую поверхность. Ось цилиндрической поверхности совпадает с заряженной осью. Длина цилиндра равна l .

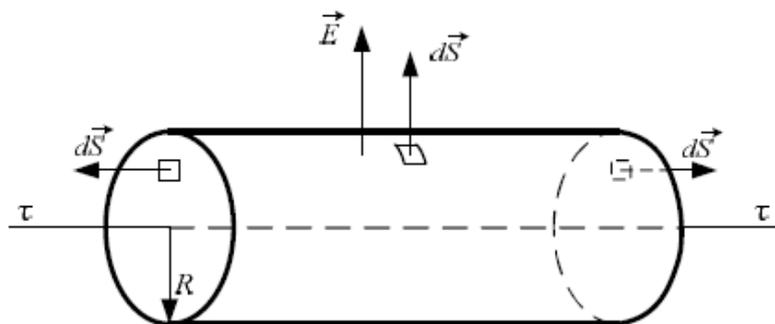


Рис. 1.7. Поле заряженной оси

Используем теорему Гаусса, которая применима для замкнутой поверхности. В рассматриваемом случае замкнутая поверхность образована боковой поверхностью цилиндра и двумя его основаниями. Поток вектора \vec{E} имеется только через боковую поверхность цилиндра. Через основания поток вектора \vec{E} отсутствует, так как вектор элемента поверхности $d\vec{S}$ каждого основания перпендикулярен вектору \vec{E} .

Вектор $d\vec{S}$ боковой поверхности и вектор напряженности электрического поля по направлению совпадают. В силу симметрии напряженность E будет одной и той же во всех точках боковой поверхности цилиндра.

По теореме Гаусса (1.5) поток вектора напряженности электрического поля через боковую поверхность цилиндра

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = E 2\pi R l = \frac{\tau l}{\epsilon_a}, \quad (1.7)$$

где $S = 2\pi R l$ – площадь боковой поверхности цилиндра.

Из выражения (1.7) следует

$$E = \frac{\tau}{2\pi R \epsilon_a}. \quad (1.8)$$

Напряженность в поле заряженной оси изменяется обратно пропорционально расстоянию R точки от оси. Наибольшая напряженность находится на поверхности заряженной оси.



Вопросы и задачи для самоконтроля

1. Дайте определение электрического поля.
2. Поясните, какое поле называют электростатическим.
3. Изложите физический смысл вектора напряженности \vec{E} и потенциала ϕ .
4. Нарисуйте картину электрического поля, нанесите линии напряженности и эквипотенциальные линии двух заряженных осей.
5. Объясните, чем отличаются свободные заряды от связанных.

6. Запишите теорему Гаусса.

7. Назовите величины, от которых зависит запас электрической прочности диэлектрика.

8. Два одинаковых точечных электрических заряда взаимодействуют в воздухе на расстоянии $R = 5$ см с силой $F = 0,144$ Н. Определите величину электрического заряда. Ответ: $2 \cdot 10^{-7}$ Кл.

9. Напряженность электрического поля на расстоянии 20 см от центра заряженного шара радиусом 4 см составляет 10 В/м. Определите напряженность поля на поверхности шара. Ответ: 250 В/м.