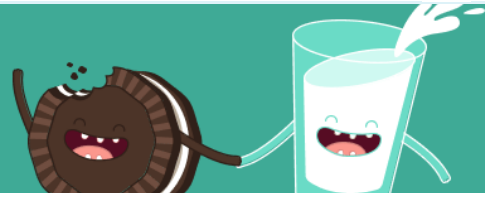


# Приведи друга

получи 1500 руб. на баланс



Справочник

Справочник

Онлайн-калькуляторы

Тесты с ответами

Как работает сервис

## Пондеромоторные силы в электрическом поле

### Содержание:

1. Результирующая сила
2. Объемные силы
3. Поверхностные пондеромоторные силы
4. Поверхностная плотность силы

#### Определение 1

**Напряженность**  $\left(\vec{E}\right)$  – это основная величина, которая характеризует электрическое поле и вычисляется по формуле:

где  $\vec{F}$  – это механическая или пондеромоторная сила, действующая в этой точке поля на пробный заряд  $q$ . Причем поле образуется всеми зарядами системы, за исключением самого заряда  $q$ .

Большее внимание необходимо уделить вопросу о механических силах, действующих на поверхностные заряды, так как несущая напряженность поля имеет по обе стороны несущей заряд поверхности различные направления и потому на самой поверхности не определена.

Допустим, у нас есть уединенный заряженный проводник, тогда взаимно отталкивающиеся элементы заряда проводника не могут уйти с его поверхности, в результате чего на поверхность проводника действуют пондеромоторные силы, стремящиеся его растянуть. Данные силы оказывают влияние также и на неодиночные проводники в электрическом поле. На элементарный заряд  $dq$ , находящийся на элементе поверхности  $dS$ , действует  $\frac{1}{2}$  напряженности поля, которое имеет проводник, поскольку 2-я половина создается этим зарядом элемента поверхности. Так, поверхностная плотность такой силы равняется:

где  $\sigma$  – это поверхностная плотность силы проводника,  $\vec{n}$  – это единичный вектор внешней нормали к поверхности проводника,  $\epsilon$  – это диэлектрическая проницаемость среды, с которой соприкасается проводник.

Итак, на поверхности заряженного проводника сила действует в направлении внешней нормали, стремясь увеличить объем тела. Следовательно, результирующую силу можно найти таким образом:

где  $S$  – это поверхность проводника.

## Объемные силы

В диэлектрике объемные электростатические силы, находящиеся в состоянии равновесия, не вызывают движения элементов объема, однако пытаются изменить среду. В итоге появляются объемные силы упругости, уравнивающие электростатические силы. Только лишь при быстром изменении полей объемные электрические силы вызывают движение элементарных объемов. Применительно к изотропным сжимаемым диэлектрикам с любой зависимостью  $\epsilon$  от плотности массы ( $\rho_m$ ) объемная плотность пондеромоторной силы  $\left(\vec{f}\right)$ , которая действует в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, равняется:

Если поляризованность линейна к  $\rho_m$ , тогда:

## Поверхностные пондеромоторные силы

Кроме объемных сил, в диэлектриках действуют еще и поверхностные пондеромоторные силы.

Допустим, есть плоская граница диэлектриков, параллельная обкладкам конденсатора. Причем напряженность однородного поля перпендикулярна границе диэлектриков. Положительной нормалью будет нормаль, направленная из 1-й среды во 2-ю. Тогда поверхностная плотность силы имеет вид:

где  $E_n$ ,  $D_n = D_{2n} = D_{1n}$  – это нормальные составляющие векторов напряженности и электрической индукции.  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  – это диэлектрические проницаемости диэлектриков. И

## Нужна помощь преподавателя?

Опиши задание — и наши эксперты тебе помогут!

### Описать задание

## Поверхностная плотность силы

Поверхностная плотность силы состоит из 2-х частей, а именно:

1. Поверхностная плотность силы ( $f_2$ ), действующая на границу раздела диэлектриков и направленная в 1-ю среду со стороны электрического поля 2-й среды, которая вычисляется как:

$$f_2 = \frac{1}{2} E_{2n} D_{2n},$$

где сила направлена по положительной нормали, условно направленной из 1-ой среды во 2-ю;

2. Плотность силы, действующая на границу против направления положительной нормали со стороны электрического поля 1-ой среды ( $f_1$ ):

$$f_1 = -\frac{1}{2} E_{1n} D_{1n}.$$

В данном случае электрические поля, находящиеся по разным сторонам границы диэлектриков, «притягивают» поверхность раздела с поверхностной плотностью силы, которая равняется объемной плотности электрической энергии, приходящейся на нормальные составляющие векторов поля.

### Пример 1

Рассмотрим пример с диэлектриками, плоская граница между которыми находится перпендикулярно обкладкам плоского конденсатора.

Данная поверхностная плотность силы состоит из 2-х частей, а именно:

1. Поверхностная плотность силы ( $f_2$ ), действующая на границу раздела диэлектриков, направленную в 1-ю среду со стороны электрического поля 2-й среды, которая вычисляется как:

$$f_2 = -\frac{1}{2} E_{2\tau} D_{2\tau},$$

в данном уравнении знак “—” показывает, что сила направлена против положительной нормали, условно направленной из 1-й среды во 2-ю;

2. Плотность силы, действующая на границу в направлении положительной нормали со стороны электрического поля 1-й среды ( $f_1$ )

тангенциальной составляющей поля. Поскольку  $E_{1\tau} = E_{2\tau} = E_\tau$ , тогда равнодействующая сил давления равняется:

$$f = -\frac{1}{2} E_\tau^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2).$$

Пондеромоторные силы зачастую находят по связи между энергией электрического поля и силами, действующими на тела в данном поле.

### Пример 2

Необходимо получить зависимость пондеромоторной силы, которая действует на диполь в каком-нибудь электрическом поле. При этом напряженность определяется вектором  $\vec{E}$ , который может меняться в пространстве. Заряды диполя по модулю равны  $q$ ,  $l$  – это плечо диполя.

**Решение**

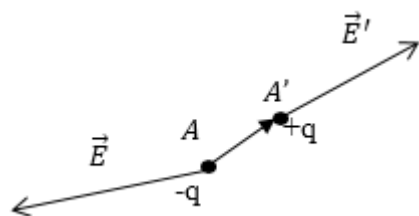


Рисунок 1

Пусть,  $\vec{E}$  и  $\vec{E}'$  – это напряженности поля в точках  $A$  и  $A'$ , в котором находится диполь (рисунок 1). Вычислим равнодействующую силу  $\vec{F}$ , влияющую на диполь:

$$\vec{F} = q\vec{E}' - q\vec{E} = q(\vec{E}' - \vec{E}),$$

где  $(\vec{E}' - \vec{E})$  – это приращение вектора напряженности на отрезке  $AA'$ , который равняется длине диполя ( $l$ ). Поскольку  $l$  мало, тогда запишем:

$$\vec{E}' - \vec{E} = l \frac{\partial \vec{E}}{\partial l} = \vec{l} \nabla \vec{E}.$$

Подставив  $\vec{E}' - \vec{E} = l \frac{\partial \vec{E}}{\partial l} = \vec{l} \nabla \vec{E}$  в  $\vec{F} = q\vec{E}' - q\vec{E} = q(\vec{E}' - \vec{E})$ , получаем:

$$\vec{F} = q \vec{l} \nabla \vec{E}.$$

**Ответ:** Пондеромоторная сила, оказывающая влияние на диполь в электрическом поле, зависит от скорости изменения данного поля в направлении оси диполя:  $\vec{F} = q \vec{l} \nabla \vec{E}$

расположены перпендикулярно плоскости (рисунок 2), бесконечна. Между пластинами постоянная разность потенциалов равняется  $U$ . Ширина пластины  $b - a$ . Пластины не касаются в точке  $O$ . Краевые эффекты можно опустить. Также можно применить то, что поверхностная плотность заряда пластин заданного конденсатора равняется:  $\sigma = \frac{\varepsilon U}{r\alpha}$ , где  $r$  – это расстояние от оси. Необходимо найти момент силы ( $M$ ), который притягивает пластины конденсатора.

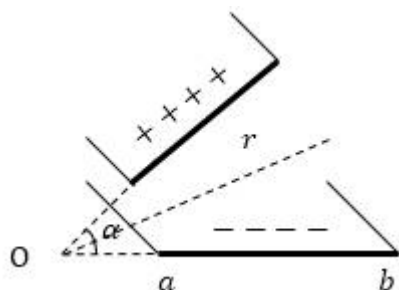


Рисунок 2

**Решение**

Поверхностная плотность силы, действующая на проводник, равняется:

$$f = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon}.$$

Получается, что на слой длиной  $l$  между  $r$  и  $r + dr$  действует сила, которая равна:

$$dF = -f l dr = -\frac{\varepsilon U^2}{2a^2 r^2} l dr,$$

где  $\sigma = \frac{\varepsilon U}{r\alpha}$ . Знак “—” показывает, что сила стремится уменьшить угол между пластинами. Вычислим результирующую силу ( $F$ ):

$$F = \int_a^b dF = -\frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \int_a^b \frac{dr}{r^2} = \frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) = \frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \cdot \frac{a-b}{ab}.$$

Линия приложения сил находится на расстоянии  $r_0$  от оси вращения. Данное расстояние найдем из условия:

$$r_0 F = \int_a^b r f F = -\frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \ln \left( \frac{b}{a} \right) \rightarrow r_0 = \frac{ab}{a-b} \ln \left( \frac{b}{a} \right).$$

Тогда момент силы относительно оси вращения равняется:

$$M = r_0 F = -\frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \left( \frac{b}{a} \right).$$

Ответ:  $M = -\frac{\varepsilon U^2 l}{2a^2} \left( \frac{b}{a} \right).$