

точке внутри проводящей сферы равна нулю: $E_0 = 0$;

УПРАЖНЕНИЕ 8

1. В направленном вертикально вниз однородном электрическом поле с напряженностью $1,3 \cdot 10^5$ В/м капля жидкости массой $2 \cdot 10^{-9}$ г оказалась в равновесии. Найдите заряд капли и число избыточных электронов на ней.

2. Почему заряженная расческа притягивает электрически нейтральные кусочки бумаги?

3. Электрический заряд $q_1 > 0$ переместили по замкнутому контуру ABCD в поле точечного заряда $q_2 > 0$ (рис. 99). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? отрицательной? равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа по перемещению заряда?

4. Двигаясь в электрическом поле, электрон перешел из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1 В. Насколько изменилась кинетическая энергия электрона? потенциальная?

5. Точечные заряды $q_1 > 0$ и $q_2 < 0$ расположены в двух вершинах равностороннего

4) потенциалы всех точек внутри сферы одинаковы.

треугольника со стороной g . Найдите модуль вектора напряженности в третьей вершине, если диэлектрическая проницаемость среды равна ϵ .

6. Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряженности поля?

7. Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Найдите напряженность электростатического поля, если известно, что поле однородно.

8. Изобразите эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего равномерно заряженного цилиндра.

9. Электрон, двигаясь в электрическом поле, увеличил скорость с $v_1 = 1 \cdot 10^7$ м/с до $v_2 \approx 3 \cdot 10^7$ м/с. Найдите разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе равно: $\frac{e}{m} = 1,76 \times 10^{11}$ Кл/кг.

§ 49. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд?

При любом способе заряжения тел — с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д. — первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

При заряджении двух проводников, например, от электростатиче-

ской машины один из них приобретает заряд $+|q|$, а другой $-|q|$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением напряжения электрическое поле между проводниками усиливается.

В сильном электрическом поле (при большом напряжении) диэлектрик (например, воздух) становится проводящим. Наступает так называемый пробой диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение между про-

водниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Емкость. Введем физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд. Эту величину называют емкостью.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном $+|q|$, а на другом $-|q|$). Действительно, если заряды удвоить, то напряженность электрического поля станет в 2 раза больше, следовательно, в 2 раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда, т. е. в 2 раза увеличится напряжение. Поэтому отношение заряда q одного из проводников (на другом находится такой же по модулю заряд) к разности потенциалов между этим проводником и соседним не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды (диэлектрической проницаемостью ϵ). Это позволяет ввести понятие емкости двух проводников.

Емкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между этим проводником и соседним:

$$C = \frac{q}{U}.$$

(7.29)

Чем меньше напряжение U при

? 1. Что называют емкостью двух проводников?

2. Почему понятие емкости неприменимо к диэлектрикам?

сообщении проводникам зарядов $+|q|$ и $-|q|$, тем больше емкость проводников. На проводниках можно накопить большие заряды, не вызывая пробоя диэлектрика. Но сама емкость не зависит ни от сообщенных проводникам зарядов, ни от возникающего напряжения.

Иногда говорят об емкости одного проводника. Это имеет смысл, если проводник является уединенным, т. е. расположен на большом по сравнению с его размерами расстоянии от других проводников. Так говорят, например, о емкости проводящего шара. При этом подразумевается, что роль другого проводника играют удаленные предметы, расположенные вокруг шара.

Единицы емкости. Формула (7.29) позволяет ввести единицу емкости.

Емкость двух проводников равна единице, если при сообщении им зарядов $+1$ Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В. Эту единицу называют фарад (Ф); $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

Из-за того что заряд в 1 Кл очень велик, емкость 1 Ф очень велика. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) — 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) — 10^{-12} Ф.

Важная характеристика проводников — емкость. Емкость проводников тем больше, чем меньше разность потенциалов между ними при сообщении им зарядов противоположных знаков.

3. В каких единицах выражается емкость?

4. Можно ли применять понятие емкости к одному проводнику?

Систему проводников очень большой электроемкости вы можете обнаружить в любом радиоприемнике или купить в магазине. Называется она конденсатором. Сейчас вы узнаете, как устроены подобные системы и от чего зависит их электроемкость.

Конденсатор. Большой электроемкостью обладают системы из двух проводников; называемые *конденсаторами*. Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники в этом случае называются *обкладками конденсатора*.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 100). Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной (рис. 74). Поэтому почти все электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора.

У сферического конденсатора, состоящего из двух concentрических сфер, все поле сосредоточено между ними.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также соединить одну обкладку с полюсом батареи, у ко-

торой другой полюс заземлен, а вторую обкладку конденсатора заземлить². Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду другой обкладки. Такой же по модулю заряд уйдет в землю.

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Электроемкость конденсатора определяется формулой (7.29).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому электроемкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Первый конденсатор, названный лейденской банкой, был создан в середине XVIII в. Было обнаружено, что гвоздь, вставленный в стеклянную банку с ртутью, накапливает большой электрический заряд. В таком конденсаторе ртуть служила одной обкладкой, а ладони экспери-

² Заземление проводников — это соединение их с землей (очень большим проводником) с помощью металлических листов в земле, водопроводных труб и т. д.

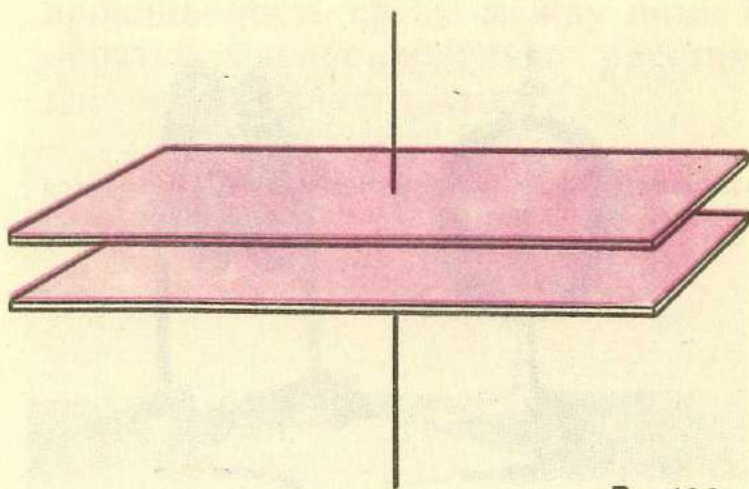


Рис 100

¹ Слово «конденсатор» в переводе на русский язык означает «сгуститель». В данном случае — «сгуститель электрического заряда».

ментатора, держащего банку, — другой. Впоследствии обе обкладки стали делать из тонкой латуни или станиоля.

Емкость плоского конденсатора. Геометрия плоского конденсатора полностью определяется площадью S его пластин и расстоянием d между пластинами. От этих величин и должна зависеть емкость плоского конденсатора. Чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить: $q \sim S$. С другой стороны, напряжение между пластинами согласно формуле (7.28) пропорционально расстоянию между ними. Поэтому емкость

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{S}{d}.$$

Кроме того, напряжение, так же как и напряженность поля, уменьшается в среде в ϵ раз: $U \sim \frac{1}{\epsilon}$. Следовательно, если между пластинами находится диэлектрик, то емкость

$$C \sim \frac{S\epsilon}{d}. \quad (7.30)$$

Проверим на опыте зависимость (7.30), полученную нами из элементарных соображений. Для этого возьмем конденсатор, у которого рас-

стояние между пластинами можно изменять, и электрометр с заземленным корпусом (рис. 101). Соединим корпус и стержень электрометра проводниками с пластинами конденсатора и зарядим конденсатор. Для этого нужно коснуться наэлектризованной палочкой пластины конденсатора, соединенной со стержнем. Электрометр покажет разность потенциалов между пластинами.

Раздвигая пластины, мы обнаружим *увеличение разности потенциалов*.

Согласно определению емкости (см. формулу (7.29)) это указывает на ее уменьшение. В соответствии с зависимостью (7.30) емкость действительно должна уменьшаться с увеличением расстояния между пластинами.

Вставив между обкладками конденсатора пластину из диэлектрика, например из органического стекла, мы обнаружим *уменьшение разности потенциалов*. Следовательно, *емкость плоского конденсатора в этом случае увеличивается*.

Расстояние между пластинами d может быть очень малым, а площадь S и диэлектрическая проницаемость — достаточно большими. Поэтому при небольших размерах конденсатор может иметь большую

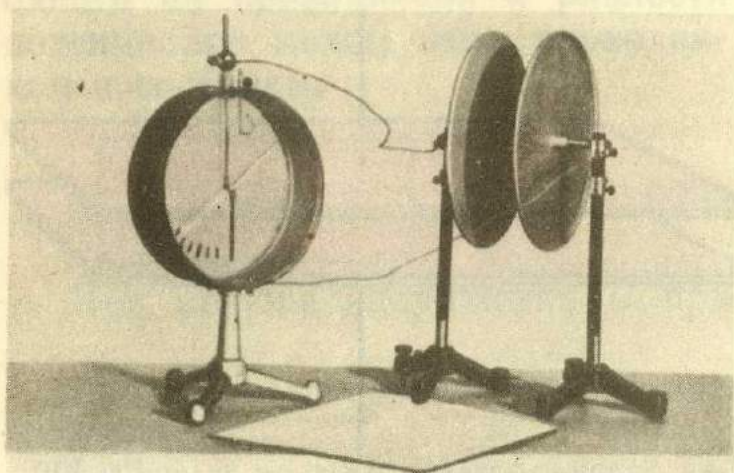


Рис 101

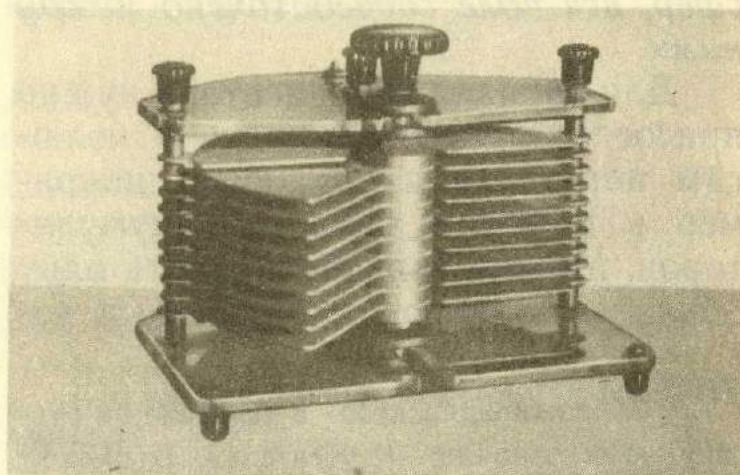


Рис 102

электроемкость. Впрочем, плоский конденсатор электроемкостью в 1 Ф должен был бы иметь площадь пластин $S=100 \text{ км}^2$ при расстоянии между пластинами $d=1 \text{ мм}$.

Измерение диэлектрической проницаемости. Зависимость электроемкости конденсатора от электрических свойств вещества между его обкладками используется для измерения диэлектрической проницаемости вещества. Для этого нужно экспериментально определить отношение электроемкости (C) конденсатора с диэлектрической пластиной между обкладками и без нее (C_0). Как следует из выражения (7.30), диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}.$$

Различные типы конденсаторов. В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок алюминиевой фольги, изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свернуты в пакет небольшого размера.

В радиотехнике широко применяют конденсаторы переменной электроемкости (рис. 102). Такой конденсатор состоит из двух систем металлических пластин, которые при вращении рукоятки могут входить

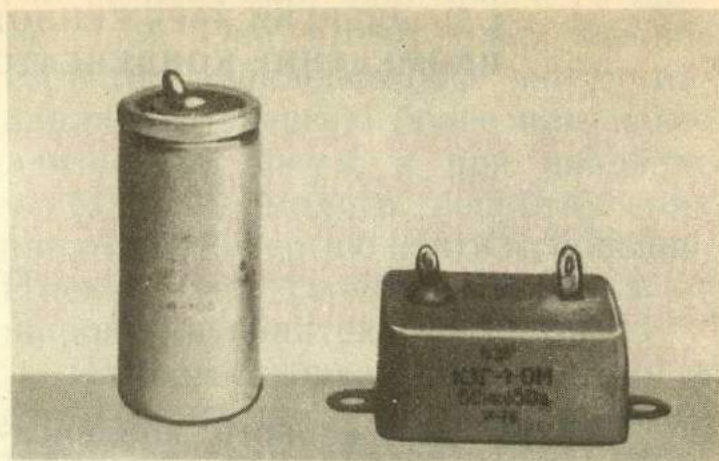


Рис 103

одна в другую. При этом меняются площади перекрывающихся частей пластин и, следовательно, их электроемкость. Диэлектриком в таких конденсаторах служит воздух.

Значительного увеличения электроемкости за счет уменьшения расстояния между обкладками достигают в так называемых электролитических конденсаторах (рис. 103). Диэлектриком в них служит очень тонкая пленка оксидов, покрывающих одну из обкладок (полосу фольги). Второй обкладкой служит бумага, пропитанная раствором специального вещества (электролита).

Конденсаторы позволяют накапливать электрический заряд. Электроемкость плоского конденсатора пропорциональна произведению площади пластин на диэлектрическую проницаемость среды между ними и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами.

?

1. От чего зависит электроемкость?
2. Как с помощью конденсатора можно

измерить диэлектрическую проницаемость вещества?

§ 51. ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Как и любая система заряженных тел, конденсатор обладает энергией. Вычислить энергию заряженного плоского конденсатора с однородным полем внутри него не сложно.

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в несколько вольт (рис. 104). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в другие формы: тепловую, световую.

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора.

Напряженность поля, созданного зарядом одной из пластин, равна $E/2$, где E — напряженность поля в конденсаторе. В однородном поле одной пластины находится заряд q , распределенный по поверхности другой пластины (рис. 105). Согласно формуле (7.21) для потенциальной

энергии заряда в однородном поле энергия конденсатора равна:

$$W_p = q \frac{E}{2} d, \quad (7.31)$$

где q — заряд конденсатора, а d — расстояние между пластинами¹.

Так как $Ed = U$, где U — разность потенциалов между обкладками конденсатора, то его энергия равна:

$$W_p = \frac{qU}{2}. \quad (7.32)$$

Эта энергия равна работе, которую совершит электрическое поле при сближении пластин вплотную.

Заменив в формуле (7.32) разность потенциалов или заряд с помощью выражения (7.29) для емкости конденсатора, получим:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (7.33)$$

Можно доказать, что эти формулы справедливы для энергии любого конденсатора, а не только для плоского.

Энергия электрического поля. Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Значит, энергия может быть выражена через основ-

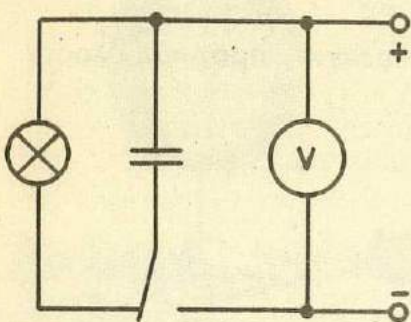


Рис 104

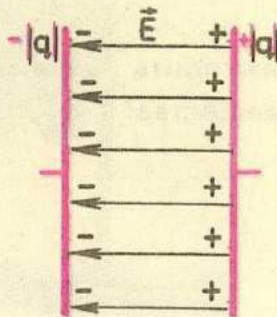


Рис 105

¹ Формула (7.21) справедлива для энергии точечного заряда в однородном поле. Но заряд на пластине можно мысленно разделить на малые элементы Δq . Энергия каждого элемента равна: $\Delta W_p = \Delta q \frac{E}{2} d$. Суммируя эти энергии, получим формулу (7.31).

ную характеристику поля — напряженность.

Так как напряженность электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов ($U = Ed$), то согласно формуле $W_p = \frac{CU^2}{2}$

энергия конденсатора прямо пропорциональна напряженности электрического поля внутри него: $W_p \sim E^2$. Детальный расчет дает следующее значение для энергии поля, приходящейся на единицу объема, т. е. для плотности энергии:

$$w_p = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (7.34)$$

где ε_0 — электрическая постоянная (см. § 36).

Применение конденсаторов. Энергия конденсатора обычно не очень велика — не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторы в качестве источников электрической энергии.

Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энер-

гии не получили практического применения. Они имеют одно важное свойство: конденсаторы могут накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке через цепь малого сопротивления они отдают энергию почти мгновенно. Именно это свойство используют широко на практике.

Лампа-вспышка, применяемая в фотографии, питается электрическим током разряда конденсатора, заряжаемого предварительно специальной батареей. Возбуждение квантовых источников света — лазеров осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой электроемкости.

Однако основное применение конденсаторы находят в радиотехнике. С этим вы познакомитесь в XI классе.

Энергия конденсатора пропорциональна его электроемкости и квадрату напряжения между пластинами. Вся эта энергия сосредоточена в электрическом поле. Плотность энергии поля пропорциональна квадрату напряженности поля.

? 1. Чему равна энергия заряженного конденсатора?

2. Перечислите основные применения конденсаторов.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Электроемкость — последняя тема раздела «Электростатика». При решении задач на эту тему могут потребоваться все сведения, полученные при изучении электростатики: закон сохранения электрического заряда, понятия напряженности поля и потенциала, поведение проводников в электростатическом поле, изменение напряженности поля в диэлектриках, закон сохранения

энергии применительно к электростатическим явлениям.

Основной формулой при решении задач на электроемкость является формула (7.29).

1. Конденсатор имеет электроемкость $C = 5$ пФ. Какой заряд находится на каждой из его обкладок, если разность потенциалов между ними $U = 1000$ В?

Решение. Согласно формуле

(7.29) емкость конденсатора $C = \frac{q}{U}$. Отсюда заряд обкладки равен $q = CU$: $q = 5 \cdot 10^{-12} \times 1000 \text{ Кл} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$.

2. Заряд конденсатора $q = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Емкость конденсатора $C = 10 \text{ пФ}$. Определите скорость, которую приобретает электрон, пройдя в конденсаторе путь от одной пластины к другой. Начальная скорость электрона равна нулю. Удельный заряд электрона $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

Решение. Начальная кинетическая энергия электрона равна нулю, а потенциальная $W_p = eU$, где U — напряжение между пластинами конденсатора. Конечная кинетическая

УПРАЖНЕНИЕ 9

1. Разность потенциалов между обкладками конденсатора емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ изменилась на 175 В . Определите изменение заряда конденсатора.

2. Заряд плоского конденсатора со слюдяным диэлектриком равен $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$. Расстояние между пластинами конденсатора $0,23 \text{ мм}$, а его емкость без диэлектрика $0,01 \text{ мкФ}$. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 7. Найдите напряженность поля в диэлектрике.

3. В пространство между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью $2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, направленной параллельно пластинам конденсатора. На какое расстояние по направлению к положительно заряженной пластине сместится электрон за время движения внутри конденсатора, если его длина равна $0,05 \text{ м}$ и разность потенциалов между пластинами 200 В ? Расстояние между пластинами конденсатора равно

энергия электрона равна $\frac{mv^2}{2}$, а потенциальная равна нулю (при выборе нулевого уровня потенциальной энергии на второй пластине). Согласно закону сохранения энергии $\frac{mv^2}{2} = eU$. Емкость конденсатора

$C = \frac{q}{U}$. Определяя отсюда напряжение U и подставляя его в предыдущую формулу, получим:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{eq}{C}.$$

Отсюда

$$U = \sqrt{\frac{2eq}{mC}} \approx 1 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

$0,02 \text{ м}$. Отношение заряда электрона к его массе равно $1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

4. Плоский конденсатор зарядили при помощи источника тока напряжением $U = 200 \text{ В}$. Затем конденсатор был отключен от этого источника тока. Каким станет напряжение U_1 между пластинами, если расстояние между ними увеличить от первоначального $d = 0,2 \text{ мм}$ до $d_1 = 0,7 \text{ мм}$, а пространство между пластинами заполнить слюдой? Диэлектрическая проницаемость слюды $\epsilon = 7$.

5. Во сколько раз изменится энергия заряженного конденсатора, отсоединенного от источника тока, если пространство между его обкладками заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$?

6. Определите плотность энергии электрического поля конденсатора, упомянутого в задаче 4, до раздвижения пластин.