 Всероссийская школа математики и физики «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

# ФИЗИКА

11

##### Экспериментальный учебник

## Часть 1

## *Электрическая емкость.*

## *Постоянный ток*

###### МОСКВА – 2007

## *Филатов Е.Н*. Физика–11. Часть 1. Электрическая емкость. Постоянный ток. Экспериментальный учебник для профильных физико-математических классов. – М.: ВШМФ «Авангард», 2007. – 428 с.

Учебник предназначен для учащихся 11-х профильных физико-математических классов. Главная цель учебника – научить учащихся самостоятельно решать задачи, поэтому большое количество задач предлагается для самостоятельного решения.

Все задачи условно разбиты на четыре категории сложности: легкие, средней трудности, трудные, очень трудные. Легкие задачи – это стандартные задачи из традиционных школьных учебников, а очень трудные соответствуют уровню вступительных экзаменов в наиболее престижные вузы Москвы: МФТИ, МГУ, МИФИ.

К большинству задач приведены ответы.

© *Филатов Е.Н., 2007*

©  *Всероссийская школа математики и физики «Авангард»,*

*2007*

**СОДЕРЖАНИЕ**

Электрическая емкость

§ 1. Электрическое поле в диэлектрике 4

§ 2. Емкость и энергия уединенного проводника 18

§ 3. Конденсатор 25

§ 4. Энергия плоского конденсатора 37

§ 5. Заряженное тело в конденсаторе 49

§ 6. Электрон в конденсаторе 57

§ 7. Параллельное и последовательное соединение

конденсаторов 66

§ 8. Пластина в плоском конденсаторе 86

§ 9. Емкость системы конденсаторов 102

Постоянный ток

§ 10. Закон Ома для простого участка цепи 116

§ 11. Последовательное и параллельное соединение

проводников 134

§ 12. Амперметр и вольтметр. Шунт и добавочное

сопротивление 168

§ 13. Закон Ома для полной цепи 185

§ 14. Расчет сложных электрических цепей 206

§ 15. Работа и мощность тока 223

§ 16. Источники тока и конденсаторы 269

§ 17. Конденсаторы и резисторы 292

§ 18. Электрический ток в металлах 305

§ 19. Электрический ток в полупроводниках 314

§ 20. Электрический ток в вакууме 326

§ 21. Электрический ток в газах 335

§ 22. Электрический ток в жидкостях. Электролиз 353

Приложения 370

Подсказки 373

Ответы 404

\_\_\_\_***электрическая емкость***

**§ 1. электрическое поле в диэлектрике**

Мы знаем, что согласно закону Кулона два точечных заряда *q*1 и *q*2, расположенных на расстоянии *r* друг от друга, взаимодействуют в вакууме с силой, равной по величине

.

Однако если эти же заряды поместить на таком же расстоянии друг от друга *не в вакууме*, а в какой-либо *среде* (воде, воздухе, керосине, спирте и т.п.), то сила их взаимодействия уменьшится и станет равной

, (1.1)

где ε – постоянная для данной среды величина, называемая ***диэлектрической проницаемостью среды***; ε – величина *безразмерная*: [ε] = 1.

|  |  |
| --- | --- |
| Т а б л и ц а 1.1 | |
| Вещество | ε |
| Воздух (при 0 °С и 760 мм рт. ст.) | 1,000594 |
| Керосин | 2,1 |
| Эбонит | 2,7 |
| Кварц | 4,5 |
| Спирт этиловый | 27 |
| Вода | 81 |
| Сегнетова соль | 1,0⋅104 |

Диэлектрическая проницаемость среды – это физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме.

В табл. 1.1 приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых веществ.

**Задача 1.1.** Два заряда взаимодействуют в воде с силой *F*1 = 3,0⋅10–4 Н. С какой силой они будут взаимодействовать в этиловом спирте?

|  |  |
| --- | --- |
| *F*1 = 3,0⋅10–4 Н | ***Решение***. По табл. 1.1 диэлектрическая проницаемость воды ε1 = 81, а этилового спирта ε2 = 27. |
| *F*2 = ? |

Согласно формуле (1.1) , , где *F*0 – сила взаимодействия зарядов в вакууме. Из этих формул нетрудно получить:

3,0⋅10–4 Н9,0⋅10–4 Н.

*Ответ*: 9,0⋅10–4 Н.

СТОП! Решите самостоятельно: А1, А2, А3, В1.

**Задача 1.2.** На каком расстоянии от шарика *А* (рис. 1.1,*а*), погруженного в керосин, должен быть расположен стальной шарик *В* объемом *V* = 9,0 мм3, чтобы он находился в равновесии? Заряд шарика *А* равен *q*1 = 7,0 нКл, а заряд шарика *В* *q*2 = –2,1 нКл. Плотность керосина ρк = 0,80⋅103 кг/м3, плотность стали ρст = 7,8⋅103 кг/м3.

|  |  |
| --- | --- |
| *V* = 9,0 мм3 = 9,0⋅10–9 м3  *q*1 = 7,0 нКл = 7,0⋅10–9 Кл  *q*2 = –2,1 нКл = –2,1⋅10–9 Кл  ρк = 0,80⋅103 кг/м3  ρст = 7,8⋅103 кг/м3 | *а* 1-1 *б* 1-2  Рис. 1.1 |
| *r* = ? |
|  |

***Решение***. На шарик *В* действуют три силы: сила тяжести , сила Архимеда  и сила Кулона  (рис. 1.1,*б*). Так как шарик *В* покоится, то

*F*А + *F*эл = *mg* ⇒ , (1)

где *k* = 9⋅109 (Н⋅м2)/Кл2; ε = 2,1 – диэлектрическая постоянная керосина по табл. 1.1. Из (1) находим *r*:



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (СИ)  = |  |

≈ 1,0⋅10–2 м = 1,0 см.

*Ответ*: ≈ 1,0 см.

СТОП! Решите самостоятельно: В2, С1.

**Задача 1.2.** Два шарика из одного материала одинаковых радиусов и масс подвешены в вакууме в одной точке на нитях одинаковой длины. Когда их заряжают одноименными зарядами, нити расходятся на некоторый угол. Какова должна быть диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика, чтобы при погружении в него этой системы угол расхождения нитей не изменился? Отношение плотности материала шариков к плотности жидкого диэлектрика равно 3.

|  |  |
| --- | --- |
| ε1 = 1  ρш/ρж = 3 | 1-3 Рис. 1.2 |
| ε2 = ? |
|  |

***Решение***. В вакууме на каждой из шариков действуют три силы: сила тяжести , сила натяжения нити  и сила Кулона  (рис. 1.2,*а*). В жидком диэлектрике к этим силам добавляется еще и сила Архимеда , причем сила натяжения  и сила Кулона  уменьшаются по величине (рис. 1.2,*б*).

Для первого случая справедливо

, (1)

для второго случая

, (2)

Запишем уравнения (1) и (2) в проекциях на оси *х* и *у*:

 (3)  (4)

Решим полученную систему их четырех уравнений. Для этого перепишем системы (3) и (4) в виде

Разделим уравнение (5) на (6), а (7) на (8) и получим

, (9) . (10)

Приравняем правые части уравнения (9) и (10)





.

*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: В3, В4, С3.

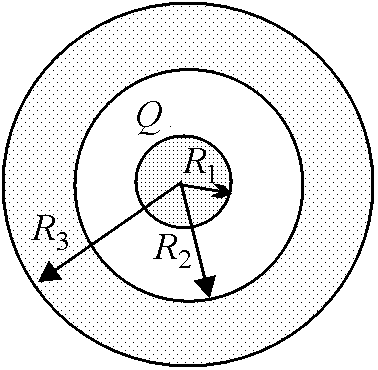


Рис. 1.3

**Задача 1.4.** Металлический заряженный шар помещен в центре толстого сферического слоя, изготовленного из диэлектрика с проницаемостью ε = 2 (рис. 1.3).

1. Нарисовать картины силовых линий внутри и вне сферического слоя.

2. Начертить графики зависимости напряженности поля и потенциала от расстояния до центра сферы.

***Решение***. 1. Нарисуем сначала картину силовых линий для заряженного шара в отсутствии диэлектрика (рис. 1.4,*а*).

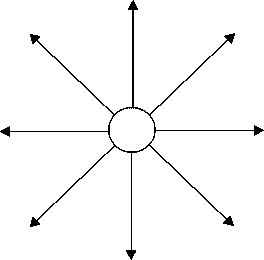
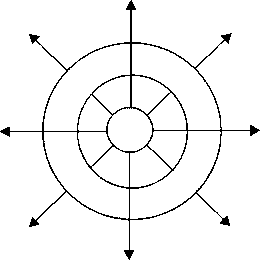
*а* *б* 

Рис. 1.4

Добавление сферического слоя из диэлектрика приведет к тому, что напряженность поля в той области, где находится диэлектрик, ослабнет в ε = 2 раза, а в остальной части пространства не изменится. Это значит, что число силовых линий в сферическом слое в 2 раза меньше, чем вне его (рис. 1.4,*б*).

2. Сначала изобразим график *Е*(*r*) для случая заряженного металлического шара в отсутствии диэлектрика, а затем уменьшим величину *Е*(*r*) в интервале (*R*2,*R*3) в 2 раза (рис. 1.5,*а*).

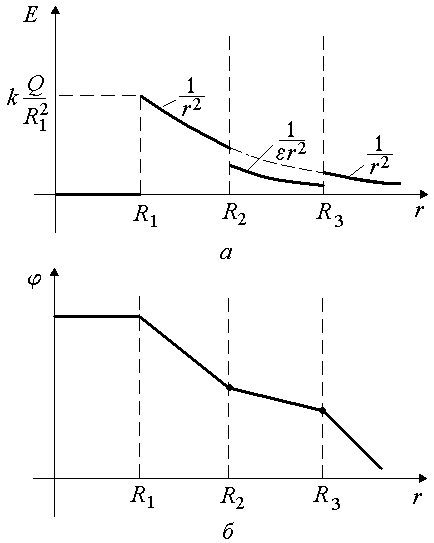


Рис. 1.5

3. График ϕ(*r*) будем строить, последовательно приближаясь от периферии к центру:

1) в области *r > R*3 величина , т.е. функция *Е*(*r*) точно такая же, как для поля точечного заряда, поэтому ;

2) в области *R*2 < *r* < *R*3 на границах сферического слоя *Е*(*r*) изменяется *скачком*, а поскольку *Е*(*r*) = –ϕ′(*r*), то функция ϕ(*r*) в точках *r = R*3 и *r = R*3 имеет *изломы* – скачки производной (1.5,*б*);

3) поскольку в области 0 < *r* < *R*1 величина *Е*(*r*) = 0, то ϕ(*r*) = = const.

СТОП! Решите самостоятельно: А7, В6, В7, С5.

**Задача 1.5.** Сплошной эбонитовый шар (ε = 2,7) радиуса *R* = = 5,0 см несет заряд, равномерно распределенный с объемной плотностью ρ = 10 нКл/м3. Определить напряженность в точках, отстоящих от центра шара на расстояниях *r*1 = 3,0 см и *r*2 = 20 см. Построить график зависимости *Е*(*r*).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ε = 2,7  *R* = 5,0 см  *r*1 = 3,0 см  *r*2 = 20 см  ρ = 10 нКл/м3 | ***Решение***. Сначала вспомним, как выглядит график *Е*(*r*) для равномерно заряженного шара при ε = 1. Воспользуемся теоремой Гаусса (рис. 1.6).  Рассмотрим поток вектора напряженности через сферу радиуса *r > R*: | 1-8  Рис. 1.6 |
| *Е*(*r*1) = ?  *Е*(*r*2) = ? |
|  |

.

Теперь рассмотрим поток вектора напряженности через сферу радиуса *r < R*:

.

Поскольку поле в диэлектрике ослабляется по сравнению с полем в вакууме в ε раз, то при 0 < *r < R* напряженность будет в ε раз меньше:

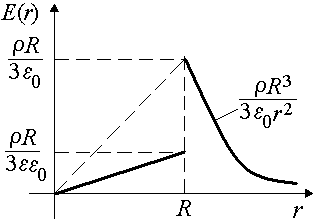


Рис. 1.7

.

График *E*(*r*) показан на рис. 1.7.

Вычислим искомые значения *E*(*r*):

4,2 Н/Кл;

1,2 Н/Кл.

*Ответ*: 4,2 Н/Кл; 1,2 Н/Кл.

СТОП! Решите самостоятельно: С7, С8.

**Поляризация диэлектрика**

*Автор*: Мы знаем, что если к *незаряженному* проводящему шарику поднести *заряженное* тело, то незаряженный шарик *притягивается к заряженному телу.* Это происходит из-за явления *электростатической индукции*: заряды на проводнике под действием внешнего поля перераспределяются (рис. 1.8). В результате сила притяжения , действующая на отрицательные заряды, оказывается больше силы отталкивания , действующей на положительные заряды. Равнодействующая этих сил  направлена в сторону внешнего заряда. Возникает вопрос: а будет ли притягиваться к внешнему заряду *незаряженный* шарик из диэлектрика?

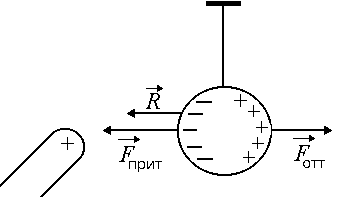
****

Рис. 1.8

*Читатель*: Думаю, что нет. Ведь заряд по диэлектрику перемещаться не может, а значит, невозможна и электростатическая индукция.

*Автор*: Опыт, однако, говорит об обратном! Если несколько раз провести по волосам пластмассовой расческой, а потом поднести ее к *незаряженным* кусочкам бумаги (бумага – отличный диэлектрик!), то кусочки бумаги притянутся к расческе. Это нетрудно проверить экспериментально. Почему же так происходит?

Существуют *полярные* и *неполярные* диэлектрики. В молекулах *полярных* диэлектриков отрицательные и положительные заряды немного смещены друг относительно друга (такова, например, молекула NaCl, рис. 1.9). В молекулах *неполярных* диэлектриков такого смещения нет. К полярным диэлектрикам относятся вода, спирты, кислоты, соли и другие вещества, к неполярным – инертные газы, кислород, водород, бензол, полиэтилен и др.

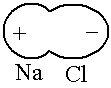
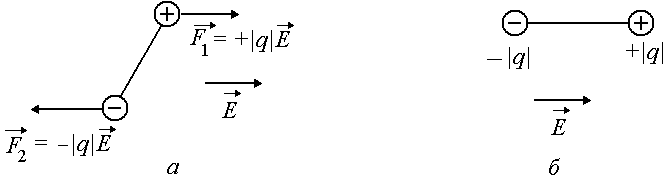


Рис. 1.9

**Что происходит с молекулами диэлектрика во внешнем электрическом поле?**

1. Рассмотрим молекулу ***полярного диэлектрика*** во внешнем поле  (рис. 1.10,*а*).

Рис. 1.10 

Электрические силы  и  создают вращающий момент, который разворачивает молекулу так, что ее ось устанавливается параллельно вектору (рис. 1.10,*б*).

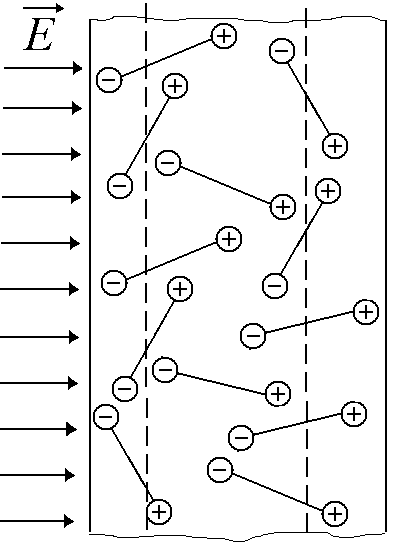


Рис. 1.11

Такому развороту, конечно же, мешает тепловое движение молекул, но, тем не менее, возникает определенная *преимущественная ориентация* молекул вдоль поля (рис. 1.11). Вследствие этого на одной поверхности диэлектрика собираются преимущественно положительные заряды, а на другой – отрицательные. В результате на *поверхности* диэлектрика появляется поверхностный *связанный* заряд с определенной плотностью σ. *Внутри* диэлектрика отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга, и средний электрический заряд *равен нулю*.

2. Рассмотрим молекулу ***неполярного диэлектрика*** во внешнем поле  (рис. 1.12). Под действием внешнего поля неполярные молекулы как бы превращаются в полярные, которые также ориентируются вдоль поля (рис. 1.13). Теперь понятно, почему незаряженные диэлектрики притягиваются к внешнему заряду (рис. 1.14).

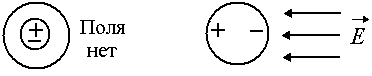
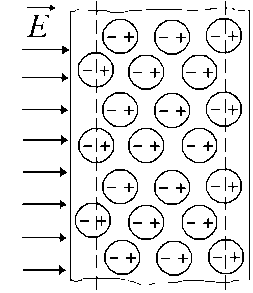
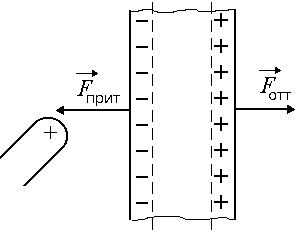


Рис. 1.12

 Рис. 1.13 Рис. 1.14

Смещение положительных и отрицательных зарядов в противоположные стороны называется ***поляризацией***.

**Почему внешнее поле в диэлектрике ослабляется?**

Дело в том, что связанные поверхностные заряды создают электрическое поле напряженностью , направленной в диэлектрике против внешнего поля . Результирующее поле в диэлектрике будет равно  (рис. 1.15), а так как ↑↓, то .

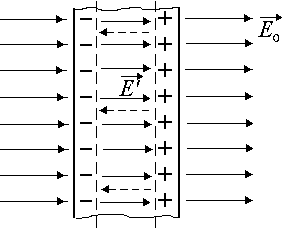


Рис. 1.15

СТОП! Решите самостоятельно: А8, В11–В13, С10.

**Задача 1.6.** Металлический шар, равномерно заряженный зарядом *q*, помещают в однородный изотропный безграничный диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε. Определить поляризационный заряд на границе диэлектрика с шаром.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *q*  ε | ***Решение***. Поле в диэлектрике создается зарядом *q* и поляризационным зарядом *q*′ (рис. 1.16). Напряженность поля в произвольной точке *А*, находящейся вне шара на расстоянии *r* от его центра, равна  . | 1-18  Рис. 1.16 |
| *q*′ = ? |
|  |

Напряженность *Е* связана с напряженностью *Е*0 поля в вакууме, создаваемого зарядом *q*, соотношением . Отсюда имеем

 .

*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: С12, С13.

**Задачи для самостоятельного решения**

***Задачи легкие***

**А1.** Алюминиевый сосуд, наполненный маслом, внесли в однородное поле, напряженность которого 75 кВ/м. Ка­кова напряженность поля в масле? в алюминиевых стенках?

**А2**. Во сколько раз надо изменить значение каждого из двух одинаковых зарядов, чтобы при погружении их в воду сила взаимодействия при том же расстоянии между ними была такая же, как в воздухе?

**А3.** Два заряда в вакууме взаимодействуют с такой же силой на расстоянии *r*1 = 27 см, как в воде на расстоянии *r*2 = 3,0 см. Определить диэлектрическую проницаемость воды.

**А4.** Два точечных заряда, находясь в воздухе на рас­стоянии *r*1 = 5 см, взаимодействуют друг с другом с силой *F*1 = 120 мкН, а находясь в некоторой непроводящей жид­кости на расстоянии *r*2 = 10 см, – с силой *F*2 = = 15 мкН. Какова диэлектрическая проницаемость жидкости?

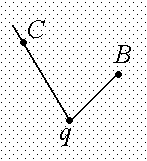
****

Рис. 1.17

**А5.** Электрическое поле образовано зарядом 5,0⋅10–7 Кл, находящимся в среде с относительной диэлектрической прони­цаемостью 2,0 (рис. 1.17). Определить разность потенциалов точек *В* и *С*, удаленных от заряда на 5,0 см и 0,20 м. Какая работа совер­шается полем при перемещении заряда 0,30⋅10–7 Кл между точ­ками *В* и С?

**А6**. Металлический заряженный шар окружен тол­стым сферическим слоем диэлектрика. Нарисовать карти­ну силовых линий электрического поля внутри и вне ди­электрика.

**А7.** Заряженный шар «запотел», покрывшись слоем воды. Как изменилась напряженность поля внутри слоя воды и вне его?

**А8.** К шарику заряженного электроскопа подносят, не касаясь его, незаряженное металлическое тело. Как изменяется отклонение листочков? Что будет, если поднести к заряженному шарику кусок стекла?

***Задачи средней трудности***

**В1.** Два точечных заряда находятся в парафине на расстоянии 20 см. На каком расстоянии они должны находиться в воздухе, чтобы сила взаимодействия между ними была такой же? Диэлектрическая проницаемость парафина ε = 2,2.

**В2**. Сосуд с маслом, диэлектрическая проницаемость ко­торого ε = = 5,0 помещен в вертикальное однородное электриче­ское поле. В масле находится во взвешенном состоянии алюминиевый шарик диаметром *d* = = 3,0 мм, имеющий заряд *q* = 1,0⋅10–7 Кл. Определите напряженность электрического поля, если плотность алюминия ρAl = 2,6⋅103 кг/м3 , а масла ρм = 0,90⋅103 кг/м3.

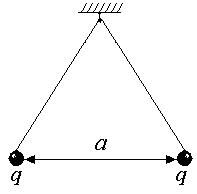


Рис. 1.18

**В3.** Два одинаковых заряженных шарика, подвешенных на нитях равной длины в одной точке, разошлись в воз­духе на некоторый угол 2α. Какова должна быть плот­ность ρ материала шариков, чтобы при погружении их в керосин (диэлектрическая проницаемость ε = 2,1) угол между нитями не изменился? Плотность керосина ρк = 0,80⋅103 кг/м3.

**В4.** Заряженные шарики, подвешенные на длинных нитях так, как показано на рис. 1.18, помещены в транс­форматорное масло. Плотность материала шариков больше плотности масла ρ0, начальное расстояние между шариками *а*. Определить расстояние *b* между шариками после опу­скания их в масло. Диэлектрическая проницаемость масла ε.

**В5.** Два малых заряженных шара, расположенных на достаточно большом постоянном расстоянии друг от друга, помещаются последовательно в ряд сред с возрастающими диэлектрическими проницаемостями. При этом в одной серии опытов поддерживается все время постоянной величина зарядов шаров, в другой – остается постоянной разность потенциалов. Как в этих случаях будет меняться сила взаимодействия шаров с ростом диэлектрической проницаемости?

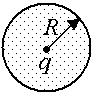


Рис. 1.19

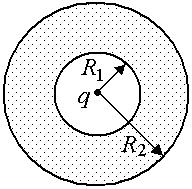


Рис. 1.20

**В6.** Точечный заряд *q* находится в центре равномерно заряженного шара из диэлектрика радиусом *R* (рис. 1.19). Объемная плотность заряда ρ, диэлектрическая проницаемость ε. Построить графики *Е*(*r*) и ϕ(*r*). Нарисовать картину силовых линий.

**В7.** Точечный заряд *q* окружен незаряженным слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε (рис. 1.20). Построить графики *Е*(*r*) и ϕ(*r*). Нарисовать картину силовых линий.

**В8.** Металлический шар радиусом *R* = 4,0 см заряжен до потенциала ϕ0 = 2,0 В. Определить напряженность и потенциал электростатического поля на расстояниях *l*1 = 2,0 см и *l*2 = 6,0 см от центра шара. Рассмотреть два случая: 1) шар находится в воздухе; 2) шар помещен в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε = 2,0.

**В9**. Две тонкие металлические концентрические сферы ра­диусами *R*1 и *R*2 (*R*1 < *R*2) погружены в диэлектрическую среду с проницаемостью ε так, что диэлектрик проникает и в пространство между сферами. Внутренняя сфера обладает зарядом *Q*. Найти напряженность поля *Е* и потенциал ϕ как функцию расстояния *r* от центра сфер.

**В10.** Напряженность электрического поля, создаваемого однородно заря­женной диэлектрической сферой радиуса *r*0 (ε = 2,0), изменяется при *r* < *r*0 по закону *Е* = (1/3)(ρ*r*/ε0ε) в диэлектрике. При радиусе, равном *r*0 = 5,0 см, *Е*1 = 2,0 В/м. Определить объемную плотность заряда ρ и зависимость *Е* от *r* при *r > r*0.

**В11.** Две параллельные металлические пластины заря­жены так, что притягиваются с силой *F*. Изменится ли эта сила, если ввести между ними пластинку из диэлектрика?

**В12.** Два разноименно заряженных шарика находятся на некотором расстоянии друг от друга. Между ними вносят стеклянный стержень. Как изменится сила их взаимодействия?

**В13.** Можно ли при помощи электризации через влияние получить два куска диэлектрика, наэлектризованных разноименно, если диэлек­трик разрезать пополам?

***Задачи трудные***

**С1**. Найти натяжение нити, соединяющей одинаковые шарики радиуса *r* с одинаковыми зарядами *Q.* Один из ша­риков плавает на поверхности жидкости плотности ρ и диэлектрической проницаемости ε, а второй шарик имеет массу *т* и висит на нити внутри жидкости. Расстояние между центрами шариков *L*.

**С2.** Два одинаковых алюминиевых шарика радиусом *r* на­деты на тонкий непроводящий стержень и опущены в керосин. Один из шариков закреплен, второй может свободно перемещаться вдоль стержня. У каждого миллиарда атомов неподвижного шарика от­нято по одному электрону и все эти электроны перенесены на подвиж­ный шарик. На каком расстоянии будут находиться в равновесии заряженные шарики при вертикальном положении стержня?

**С3.** Два маленьких одинаковых одноименно заряженных шарика радиуса *r* = 1 см подвешены на двух нитях длины *l* = 1 м. Заряды шариков *q* = =4⋅10-6 Кл. Нити, на которых подвешены шарики, составляют угол α1 = 90°.

1. Определить массу шариков.

2. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если его плотность ρ = 0,8⋅103 кг/м3 при условии, что при погружении шариков в жидкий однородный диэлектрик угол между нитями будет α2 = 60°.

**С4.** Одинаковые шарики, подвешенные на закреплен­ных в одной точке нитях равной длины, зарядили одина­ковыми одноименными зарядами. Шарики оттолкнулись и угол между нитями стал равен α = 60°. После погруже­ния шариков в жидкий диэлектрик угол между нитями уменьшился до β = 50°. Найти диэлектрическую проницаемость среды. Выталкивающей силой пренебречь.

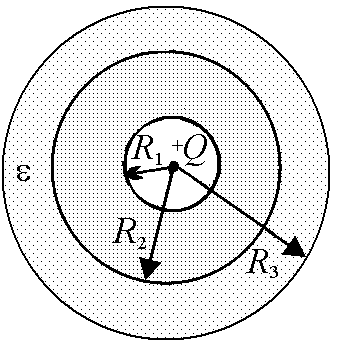
****

Рис. 1.21

**С5.**  Постройте графики зависимостей напряженности и потенциала электрического поля от расстояния для следующей системы: точечный заряд +*Q* находится в центре металлической сферической оболочки, к которой примыкает сферическая оболочка из диэлектрика (рис. 1.21).

**С6.** Радиус металлического шара *R* = 5,0 см а толщина сферического слоя эбонита, окружающего шар*d* = 5,0 см. Заряд шара *q* = 6,0⋅10–9 Кл. Вычислить напряженность поля в точках, лежащих на расстояниях *r*1 = 6,0 см и *r*2 = 12 см от центра шара, и построить график зависимости напряженности от расстояния.

**С7.** Равномерно заряженный диэлектрический шар радиуса *R*0 окружен металлическим сферическим слоем с внутренним радиусом *R*1 и внешним радиусом *R*2 (рис. 1.22). Заряд шара *Q*, диэлектрическая проницаемость ε. Построить графики *E*(*r*) и ϕ(*r*).

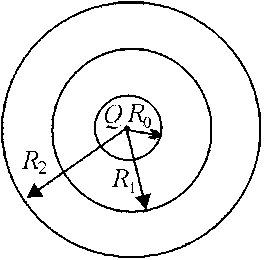
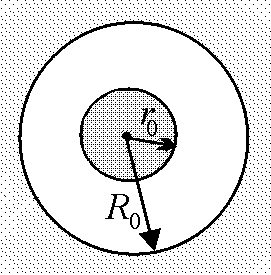
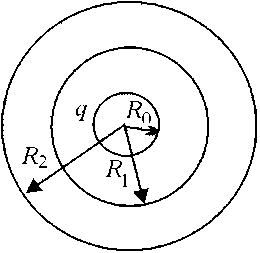
  

Рис. 1.22 Рис. 1.23 Рис. 1.24

**С8.** В пространстве, заполненном диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε, находится сферическая полость радиуса *R*0, внутри которой находится равномерно заряженный шар из такого же диэлектрика с зарядом *Q* и радиуса *r*0 (рис. 1.23). Построить графики *E*(*r*) и ϕ(*r*).

**С9.** Шар из диэлектрика радиуса *R*0 равномерно заряжен электричеством с объемной плотностью заряда ρ и окружен сферическим слоем из диэлектрика с внутренним радиусом *R*1 и внешним радиусом *R*2 (рис. 1.24). Диэлектрическая проницаемость ε. Построить графики *E*(*r*) и ϕ(*r*).

**С10.** Как известно, сила взаимодействия между двумя электрическими зарядами меньше в воде, чем в воздухе. Казалось бы, этим можно воспользоваться для созда­ния «вечного двигателя» следующим образом: взяв два разноименных заряда в точках *1* и *2* (рис. 1.25), сблизить их в воздухе, затем одновременно опус­тить в воду, раздвинуть под водой, затем одновременно поднять в воздух в прежние положения, и далее повторять весь процесс сначала. При этом работа, полученная при сближении, больше той, которая затрачивается при раздвигании, так как силы электрического взаимодействия в воздухе больше, чем в воде. Где ошибка?

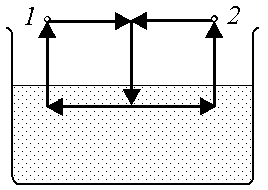


Рис. 1.25

**С11.** Две заряженные параллельные плоскости с поверхностной плот­ностью заряда ±σ, разнесены на расстояние *d* друг от друга и разделены прокладкой толщины *h*, диэлектрическая проницаемость которой ε. Найти поверхностную плотность индуцированного поляризационного заряда на прокладке, напряженность электрического поля в пространстве между пластинами и разность потенциалов между ними.

**С12.** Две вертикально расположенные пластины заряжены так, что разность потенциалов между ними равна Δϕ = 400 В. Пластины погружают в масло. Какова поверхностная плотность связанных зарядов, если толщи­на масляного слоя *d* = 2,0 мм?

**С13.** Проводящий шар радиуса *r* с зарядом *Q* окружен слоем диэлектрика, внешний радиус которого *R*. Диэлектрическая проницаемость слоя ε. Найдите поверхностную плотность заряда на внутренней и внешней поверхностях диэлектрического слоя. Нарисуйте линии напряженности электрического поля. Нарисуйте график зависимости напряженности и потенциала поля от расстояния до центра шара.

**С14.** Металлический шар радиуса *R* = 5,0 см, несущий заряд, равномерно распределенный с поверхностной плот­ностью σ = 2,0⋅10–9 Кл/м2, погружают в керосин. Опре­делить величину и знак поляризационного заряда, наведенного на границе металл–диэлектрик.

***Задачи очень трудные***

**d1.** На дне сосуда находится тонкая металлическая пластинка, площадь которой *S* много меньше площади дна сосуда. В сосуд налита жидкость с диэлектрической прони­цаемостью ε. Глубина жидкости много меньше линейных раз­меров пластинки. Что произойдет с жидкостью, если пластинке сообщить заряд +*Q*?

**D2.** Пространство между двумя концентрическими сфе­рами радиусов *r*1 и *r*2 заполнено диэлектриком с диэлектри­ческой проницаемостью ε. В центре сфер находится точеч­ный заряд +*Q*. Найти напряженность и потенциал как функцию расстояния от центра сфер, а также величину поляризационных зарядов.

**§ 2. емкость и энергия**

**уединенного проводника**

**Емкость уединенного проводника**

Экспериментально установлено, что потенциал заряженного проводника прямо пропорционален его заряду:

ϕ ~ *q*. (2.1)

Это позволяет ввести в рассмотрение величину, равную отношению заряда проводника к его потенциалу:

*С* = *q*/ϕ. (2.2)

Величина *С* называется ***электрической емкостью*** проводника. В системе СИ [*C*] = [*q*]/[ϕ] = Кл/В = Ф (фарад). Наряду с фарадом используются также микрофарад (1 мкФ = 10–6 Ф) и пикофарад (1пФ = 10–12 Ф).

**Задача 2.1.** Вычислить емкость шара радиуса *R*.

|  |  |
| --- | --- |
| *R* | ***Решение.*** Пусть заряд шара равен *q*, тогда его потенциал , где  в СИ и *k* = 1 в СГСЭ. |
| *C* = ? |
|  |

Согласно формуле (2.2)

*С* = *q*/ϕ = ,

тогда

в СИ: *С* = 4πε0*R*, (2.3)

в СГСЭ: *C = R*. (2.4)

*Ответ*: *С* = 4πε0*R*  (СИ), *C = R* (СГСЭ).

Заметим, что из (2.4) следует, что электрическая емкость в системе СГСЭ измеряется в единицах *длины*: [*C*] = [*R*] = см.

СТОП! Решите самостоятельно: А1–А3, В2.

*Читатель*: А почему отношение *q*/ϕ назвали именно электрической *емкостью*, а не как-нибудь еще?

*Автор*: Чем больше *С*, тем больший заряд можно поместить на данный проводник. В самом деле, если при данном *q* величина *С* велика, то величина ϕ соответственно мала (согласно (2.2)). Значит, заряд на проводнике создает около себя относительно слабое электрическое поле, которое не сможет «пробить» воздух. Следовательно, заряд не будет стекать с нашего проводника.

Рассмотрим, как зависит емкость от диэлектрической проницаемости среды.

**Задача 2.2.** Вычислить емкость шара радиуса *R*, помещенного в среду с диэлектрической проницаемостью ε.

|  |  |
| --- | --- |
| *R*  ε | ***Решение.*** Если мы поместим металлический шар в среду с диэлектрической проницаемостью ε, то потенциал шара будет равен , а емкость |
| *C* = ? |
|  |

*С* = *q*/ϕ = .

*Ответ*: *С* = .

Итак, в среде емкость шара в ε раз больше, чем емкость такого же шара в вакууме

*С* = . (2.5)

СТОП! Решите самостоятельно: А4, А5.

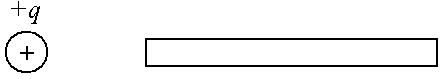
*Читатель*: Почему нельзя ввести понятия емкости диэлектрика?

*Автор*: Потому что потенциал разных точек диэлектрика различен и зависит от того, *как именно* распределен по поверхности заряд, так как заряды в диэлектрике не могут свободно перемещаться под действием электрического поля.

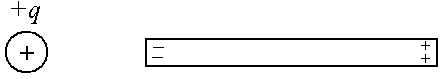
*Читатель*: А зависит ли электрическая емкость от *материала* проводника?

*Автор*: Нет. Формула (2.2) справедлива для любого проводящего материала. Но вот от присутствия поблизости других проводников, даже незаряженных, емкость проводника зависит очень сильно.

В самом деле, пусть рядом с заряженным шаром мы поместили незаряженный металлический стержень (рис. 2.1). Как Вы думаете, что произойдет?

 Рис. 2.1

*Читатель*: Я думаю, что из-за индукции заряды на стержне перераспределятся (рис. 2.2).

 Рис. 2.2

*Автор*: Совершенно верно. А как повлияют отрицательные заряды стержня на поле около нашего положительного заряженного шара: ослабят они его или усилят?

*Читатель*: Конечно, ослабят. Они же противоположного знака!

*Автор*: Значит, и потенциал шара уменьшится. А тогда как изменится емкость шара согласно формуле (2.2)?

*Читатель*: Возрастет! Получается, что, поднося к одному проводнику другой, мы увеличиваем его емкость?

*Автор*: Совершенно верно!

СТОП! Решите самостоятельно: В1, С1, С2.

**Задача 2.3.** Потенциал проводников с емкостями *С*1 = 6,0 пФ и *С*2 = 9,0 пФ равны соответственно ϕ1 = 2,0⋅102 В и ϕ2 = 8,0⋅102 В. Найти суммарный заряд и потенциал проводников после соединения их проводом. Индукцией пренебречь.

|  |  |
| --- | --- |
| *С*1 = 6,0 пФ = 6,0⋅10–12 Ф  *С*2 = 9,0 пФ = 9,0⋅10–12 Ф  ϕ1 = 2,0⋅102 В  ϕ2 = 8,0⋅102 В | ***Решение.*** До соединения справедливо *q*1 = *C*1ϕ1 и *q*2 = *C*2ϕ2. Тогда общий заряд  *Q = q*1 + *q*2 = *C*1ϕ1 + *C*2ϕ2,  причем после соединения величина общего заряда измениться не могла.  Подставим численные значения: |
| *Q* = ? ϕ = ? |
|  |

*Q = C*1ϕ1 + *C*2ϕ2 =

= 6,0⋅10–12 Ф ⋅ 2,0⋅102 В + 9,0⋅10–12 Ф ⋅ 8,0⋅102 В ≈

≈ 8,4⋅10–9 Кл.

Пусть после соединения заряды проводников стали равны  и , тогда справедливы следующие соотношения:



Из формулы (2) получаем , подставим  в формулу (1):

,

подставляя  в формулу (3), находим

.

Подставим численные значения:



*Ответ*: *Q = C*1ϕ1 + *C*2ϕ2 ≈ 8,4⋅10–9 Кл;



СТОП! Решите самостоятельно: А6, В4, С3.

**Энергия уединенного проводника**

**Задача 2.4.** Вычислить энергию *W* уединенного проводника, если его заряд равен *Q*, а потенциал *U*.

|  |  |
| --- | --- |
| *Q*  *U* | ***Решение.*** Согласно формуле (2.2) *С* = *Q*/ϕ, откуда  . (1) |
| *W* = ? |

Тогда график зависимости потенциала ϕ от величины размещенного на проводнике заряда *q* имеет вид, показанный на рис. 2.3.

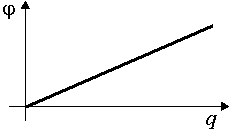


Рис. 2.2

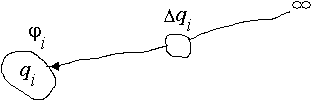


Рис. 2.4

Энергия *W* заряженного проводника равна работе, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы поместить на него заряд *Q*.

Будем постепенно переносить заряды из бесконечности (точнее с нулевого уровня потенциальной энергии) на наш проводник маленькими порциями. Пусть в некоторый момент заряд нашего проводника равен *qi*, потенциал ϕ*i*, и мы добавим ему еще маленький заряд Δ*qi* → 0 (рис. 2.4).

Для того чтобы заряд Δ*qi* перешел из бесконечности на наш уже заряженный проводник, придется совершить работу против сил электрического поля: Δ*Ai =* Δ*qi*ϕ*i*. Эту работу можно представить графически как площадь маленького прямоугольника со сторонами ϕ*i* и Δ*qi* (рис. 2.5). Тогда вся работа по зарядке нашего проводника равна площади прямоугольного треугольника с катетами *U* и *Q* (см. рис. 2.5):

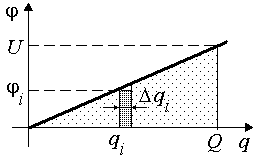


Рис. 2.5

.

Эта работа и есть искомая энергия *W* нашего проводника.

*Ответ*:

. (2.6)

Если в (2.6) подставить значение *q = CU*, получим формулу

. (2.7)

Если в (2.6) подставить значение *U = Q/C*, получим формулу

. (2.8)

СТОП! Решите самостоятельно: А7, А8, В3, С5.

**Задачи для самостоятельного решения**

***Задачи легкие***

**А1.** Уединенному проводнику сообщили заряд 1⋅10–9 Кл, зарядив до потенциала 100 В. Определить электроемкость проводника в фара­дах, микрофарадах и пикофарадах.

**А2.** Каким должен быть радиус шара, чтобы его емкость (в ва­кууме) равнялась 1 ф?

**А3.** Вычислить емкость земного шара. На сколько увеличит потенциал Земли заряд *q* = 1,0 Кл?

**А4.** Определить электроемкость уединенного металлического шара радиусом 10 см, если шар: находится в вакууме; опущен в воду.

**А5.** Во сколько раз изменится емкость проводящего шара радиуса *R*,если он сначала помещен в керосин (ди­электрическая проницаемость ε1 = 2), а затем в глицерин (диэлектрическая проницаемость ε2 = 56,2)?

**А6.** Емкости двух металлических шаров 10 и 20 пФ, а заряды на них 1,7⋅10–8 и 3⋅10–8 Кл соответственно. Будут ли перемещаться за­ряды с одного шара на другой, если их соединить проволокой?

**А7.** Какое количество теплоты *Q* выделится при зазем­лении заряженного до потенциала ϕ = 3000 В шара радиуса *R* = 5,0 см?

**А8.** Какой заряд *q* сообщен шару, если он заряжен до потенциала ϕ = 100 В, а запасенная им электрическая энергия *W* = 2,02 Дж?

***Задачи средней трудности***

**B1.** Всегда ли одинаковы емкости двух одинаковых по форме и размерам проводников?

**В2.** Шар наэлектризован так, что поверхностная плотность за­ряда равна σ*.* На расстоянии *l* от поверхности шара потенциал по­ля равен *U* вольт. Какова емкость шара?

**В3.** Проводник емкостью *С*1= 1,0⋅10–-5 мкфзаряжен до потенциа­ла ϕ1 = 6000 В, а проводник емкостью *С*2 = 2,0⋅10–5 мкФ *–* до потенциала ϕ2 = 12 000 В.Расстояние между проводниками вели­ко по сравнению с их размерами. Какое количество тепла выделит­ся при соединении этих проводников проволокой?

**В4.** Электрический заряд на одном шарике 20⋅10–8 Кл, а на другом 10⋅10–8 Кл. Емкость шариков 2,0 и 3,0 пФ соответственно. Найти окончательное распределение зарядов на шариках, после того как они будут соединены проволокой.

***Задачи трудные***

**С1.** Металлический шар радиуса *R*1,заряженный до некоторого потенциала, окружают концентрической сфе­рической проводящей оболочкой радиуса *R*2*.* Как изменит­ся потенциал и чему станет равна емкость шара, если внеш­нюю оболочку заземлить?

**С2.** Найти емкость шарового проводника радиусом *r*,окруженного прилегающим концентрическим слоем диэлектрика с внешним радиусом *R* и диэлектрической проницаемостью ε.

**С3.** Проводники, заряженные одинаковым количеством электричества, имеют потенциалы ϕ1 *=* 40 В и ϕ2 = 60 В. Каким будет потенциал этих проводников, если соединить их проволокой? (Рас­стояние между проводниками велико по сравнению с их размера­ми.)

**С4.** Два малых металлических проводника емкостью *C*1 = 2,0⋅10–12 Ф и *С*2 = 3,0⋅10–12 Ф имеют заряды *q*1 = 0,80 мкКл и *q*2 = 0,20 мкКл и расположены на расстоянии *l* = 3,0 м друг от друга. Определить силу кулоновского взаимодействия проводников после того, как они были на короткое время соединены друг с другом проволочкой.

**С5.** Два одинаковых шара удалены на очень большое расстоя­ние друг от друга. Поле первого шара обладает энергией *W*1 *=* 0,0016 Дж,а поле второго – энергией *W*2 = 0,0036 Дж. Какое количество тепла вы­делится при соединении этих шаров проволокой?

**§ 3. КОНДЕНСАТОР**

***Конденсатор*** представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники в этом случае называются *обкладками* конденсатора.

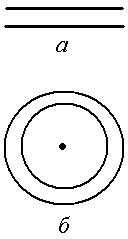


Рис. 3.1

*Плоский* конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 3.1,*а*), сферический – из двух концентрических сфер (рис. 3.1,*б*).

**Емкость конденсатора**

Если сообщить обкладкам конденсатора равные по величине и противоположные по знаку заряды +*Q* и –*Q*, то между обкладками возникнет некоторая разность потенциалов *U*, причем, как показывает опыт, величина *U* прямо пропорциональна величине заряда *Q*:

*U ~ Q*.

Тогда можно записать

*Q = CU*,

где *С* – некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров проводников, их формы, расстояния между ними, а также от свойств диэлектрика, расположенного между обкладками.

Величина *С*, равная отношению заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками, называется ***емкостью конденсатора***:

*C = Q/U.* (3.1)

Ясно, что чем больше величина *С*, тем бóльшие по величине заряды +*Q* и –*Q* можно при данной разности потенциалов собрать на обкладках конденсатора. Так, если *С* = 1 Ф, то при разности потенциалов *U* всего 1 В на обкладках будут *огромные* заряды + 1 Кл и –1 Кл. Но конденсаторы с такой огромной емкостью применяются, прямо скажем, не часто.

Емкости конденсаторов обычно измеряют либо в микрофарадах, либо в пикофарадах. Напомним, что 1 мкФ = 10–6 Ф, а 1 пФ = = 10–12 Ф.

СТОП! Решите самостоятельно: А1–А3, А5, В1.

**Емкость плоского конденсатора**

**Задача 3.1.** Вычислить емкость плоского конденсатора, если площадь каждой его обкладки равна *S*, а расстояние между обкладками *d*. Между обкладками – вакуум. Размеры обкладок много больше расстояния между ними (*d*2 << *S*).

|  |  |
| --- | --- |
| *S*  *d* | ***Решение.*** Сообщим обкладкам заряды +*Q* и *–Q* (рис. 3.2). Тогда поверхностная плотность заряда σ = *Q/S*.  3-2 Рис. 3.2 |
| *С* = ? |
|  |

Каждую обкладку в условиях данной задачи можно рассматривать как бесконечную заряженную плоскость. Напряженность поля бесконечной заряженной плоскости, как мы знаем, равна и не зависит от расстояния до плоскости. Напряженность поля каждой обкладки  и направлена, как показано на рис. 3.3.

Согласно принципу суперпозиции = =+. Напряженность поля между обкладками равна

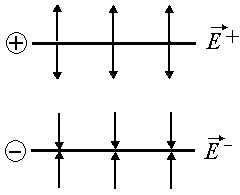


Рис. 3.3

= || + || = ,

а поле *снаружи* отсутствует, так как

= || – || = .

*Договоримся*, что потенциал отрицательно заряженных обкладок равен нулю: ϕ = 0. Тогда разность потенциалов между обкладками равна потенциалу положительно заряженной пластины ϕ+ и равна работе электрического поля в конденсаторе по перемещению единичного положительного заряда с верхней (положительной) обкладки на нижнюю (отрицательную):

.

Тогда согласно формуле (3.1) емкость конденсатора составит

.

*Ответ*:

. (3.2)

Заметим, что чем меньше расстояние между обкладками *d*, тем больше емкость конденсатора.

**Задача 3.2.** Как изменится результат задачи 3.1, если между пластинами конденсатора поместить диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε?

|  |  |
| --- | --- |
| *S*, *d*, ε | ***Решение.*** Диэлектрик ослабит поле между пластинами в ε раз, поэтому напряженность поля в конденсаторе будет равна *Е* = σ/εε0, тогда |
| *С* = ? |
|  |

,

.

*Ответ*:

. (3.3)

Таким образом, введение в пространство между обкладками конденсатора диэлектрика увеличивает емкость в ε раз!

СТОП! Решите самостоятельно: А6–А8, В2.

**Задача 3.3.** Плоский конденсатор зарядили и отключили от источника напряжения. После этого увеличили расстояние между пластинами в 2 раза. Как изменились при этом емкость конденсатора, напряженность поля в конденсаторе, напряжение (разность потенциалов) между обкладками?

|  |  |
| --- | --- |
|  | ***Решение.*** 1.Согласно формуле (3.3) , поэтому , т.е. емкость уменьшилась в 2 раза.  2. Поскольку конденсатор отключен от источника напряжения, то заряды на пластинах не могут измениться, |
| *С*2/*С*1 = ?  *Е*2/*Е*1 = ?  *U*2/*U*1 = ? |
|  |

а значит, не меняется и поверхностная плотность зарядов σ. Так как *Е* = σ/ε0, то напряженность не изменилась и *Е*2/*Е*1 = 1.

3. Поскольку *U = Ed*, то , т.е. напряжение возросло в 2 раза.

*Ответ*: *С*2/*С*1 = 1/2; *Е*2/*Е*1 = 1; *U*2/*U*1 = 2.

СТОП! Решите самостоятельно: А14, В9.

**Задача 3.4.** Плоский конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения. Расстояние между его обкладками увеличили в 2 раза. Как изменились при этом емкость конденсатора, напряженность внутри конденсатора и напряжение между обкладками?

|  |  |
| --- | --- |
|  | ***Решение.*** 1.Емкость никак не зависит ни от напряжения, ни от заряда, поэтому она изменилась точно так же, как и в задаче 3.3: .  2. Поскольку конденсатор все время подключен к источнику напряжения, то напряжение на его обкладках все |
| *С*2/*С*1 = ?  *Е*2/*Е*1 = ?  *U*2/*U*1 = ? |
|  |

время постоянно, т.е. *U*2 = *U*1, или *U*2/*U*1 = 1.

3.Так как *Е* =, то , т.е. напряженность поля уменьшилась в 2 раза. Это произошло потому, что *заряд* на обкладках уменьшился, т.е. часть заряда «вернулась» обратно в источник!

*Ответ*: *С*2/*С*1 = 1/2; *U*2/*U*1 = 1; *Е*2/*Е*1 = 1/2.

СТОП! Решите самостоятельно: А15, А16.

**Задача 3.5.** Плоский конденсатор зарядили и отключили от источника напряжения. После этого между обкладками вставили пластину из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε. Как изменились емкость, напряженность поля между обкладками и напряжение?

|  |  |
| --- | --- |
| ε | ***Решение.*** 1.Согласно формуле (3.3) , поэтому емкость возрастет в ε раз: *С*2/*С*1 = ε.  2. Поскольку *Е* = σ/εε0, а величина σ не изменилась, то *Е* уменьшилась в ε раз: *Е*2/*Е*1 = 1/ε.  3. Так как *U = Ed*, то , т.е. напряжение также уменьшилось в ε раз. |
| *С*2/*С*1 = ?  *Е*2/*Е*1 = ?  *U*2/*U*1 = ? |
|  |

*Ответ*: *С*2/*С*1 = ε; *Е*2/*Е*1 = *U*2/*U*1 = 1/ε.

СТОП! Решите самостоятельно: А12, В4, С1.

**Задача 3.4.** Плоский конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения. Как изменятся напряжение, напряженность поля между обкладками и заряд конденсатора, если между ними вставить пластинку из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε?

|  |  |
| --- | --- |
| ε | ***Решение.*** 1. Из условия задачи ясно, что *U* = const, т.е. *U*2/*U*1 = 1.  2. Так как *Е* = *U/d*, то величина *Е* также не меняется: *Е*2/*Е*1 = 1.  3. Поскольку *Е*1 = σ/ε0, *Е*2 = σ/εε0, и при этом *Е*1 = *Е*2, |
| *Е*2/*Е*1 = ?  *U*2/*U*1 = ?  *q*2/*q*1 = ? |
|  |

то , т.е. поверхностная плотность заряда увеличилась в ε раз. Так как *q* = σ*S*, то . Итак, величина заряда возросла в ε раз, это увеличение «обеспечил» источник напряжения.

*Ответ*: *q*2/*q*1 = ε; *Е*2/*Е*1 = *U*2/*U*1 = 1.

СТОП! Решите самостоятельно: В5, В7, В8.

**Сила, с которой притягиваются**

**обкладки плоского конденсатора**

**Задача 3.7.** Обкладки плоского воздушного конденсатора площадью *S* каждая заряжены с поверхностными плотностями зарядов +σ и –σ. С какой силой они притягиваются?

|  |  |
| --- | --- |
| *S*  σ | ***Решение****.* Вычислим силу, с которой положительно заряженная пластина действует на отрицательно заряженную (рис. 3.4).  Пусть – напряженность поля, созданного положительной пластиной, а *Q* – величина заряда каждой пластины, тогда .  *Ответ*:  . (3.4) |
| *F* = ? |
| 3-4  Рис. 3.4 |

СТОП! Решите самостоятельно: А17–А19, В10.

*Читатель*: А как изменится сила взаимодействия между пластинами, если между ними ввести диэлектрик?

*Автор*: Если конденсатор отключен от источника напряжения, то сила взаимодействия не изменится.

*Читатель*: Почему? Ведь напряженность поля уменьшится в ε раз?

*Автор*: Напряженность уменьшится только в самом диэлектрике. Если между диэлектриком и обкладками есть хотя бы небольшой зазор, то поле  в этом зазоре от введения диэлектрика никак не изменится, а значит, не изменится и сила притяжения пластин (рис. 3.5).

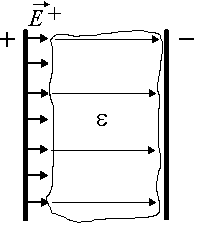


Рис. 3.5

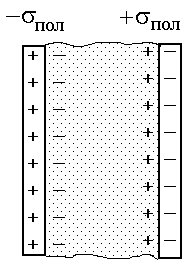


Рис. 3.6

*Читатель*: А если зазор полностью отсутствует? Например, если диэлектрик – жидкость?

*Автор*: Отсутствие зазора ничего не изменит. В этом случае в пространстве между обкладками просто появятся еще две разноименно заряженные плоскости, образованные поляризационными зарядами (рис. 3.6). Так как заряды этих плоскостей равны по величине и противоположны по знаку, то их суммарное действие на положительно заряженную обкладку равно нулю, следовательно, сила, с которой отрицательная обкладка действует на положительную, не изменится.

*Читатель*: А если мы введем диэлектрик в конденсатор, подключенный к источнику напряжения?

*Автор*: Как мы уже выяснили, в этом случае величина σ возрастает, значит, увеличится и сила притяжения между обкладками (см. формулу (3.4)).

СТОП! Решите самостоятельно: В11.

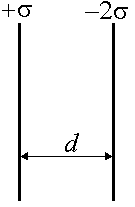


Рис. 3.7

**Задача 3.8.** Обкладки плоского воздушного конденсатора заряжены так, как показано на рис. 3.7. Определить емкость конденсатора и напряженность поля внутри конденсатора. Площадь обкладок *S*, расстояние между ними *d*.

|  |  |
| --- | --- |
| *S*, σ, *d* | ***Решение****.*  *Читатель*: По-моему, вопрос про емкость провокационный: она никак не зависит от того, как заряжен конденсатор, и всегда равна  (если ε = 1). |
| *С* = ?  *Е* = ? |
|  |

*Автор*: Совершенно верно.

*Читатель*: А напряженность надо искать как суперпозицию полей  и :

.

*Автор*: Правильно.

*Ответ*: ;.

СТОП! Решите самостоятельно: В14, В15, С8.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

***Задачи легкие***

**А1.** Изменится ли емкость конденсатора или уединенного проводника, если увеличить их заряд в 2 раза?

**А2**. Какова емкость конденсатора, если при его заряд­ке до напряжения *U =* 1,4 кВ он получает заряд *q* = 28 нКл?

**А3.** Плоский конденсатор имеет емкость *С* = 5 пФ. Какой заряд находится на каждой из его пластин, если разность потенциалов между ними *V* = 1000 В?

**А4.** Емкостьодного конденсатора *С*1 = 200 пФ, а другого *С*2 = 1 мкФ. Сравнить заряды, накопленные на этих конденса­торах при их подключении к полюсам одного и того же источника постоянного напряжения.

**А5.** До какого напряжения нужно зарядить конденсатор емкостью *С* = 4,0 мкФ, чтобы ему передать заряд *q =* 4⋅10–4 Кл?

**А6.** В плоском конденсаторе увеличили расстояние между пласти­нами в 3 раза, а площадь плас­тин уменьшили в 2 раза. Как из­менилась емкость конденсатора?

**А7.** Площадь пластины слюдяного конденсатора *S =* 15 см2, а расстояние между пластинами *d =* 0,02 см (ε = 6,0). Какова емкость конденсатора?

**А8.** Площадь каждой пластины плоского конденсато­ра равна *S =* = 520 см2. На каком расстоянии друг от друга на­до расположить в воздухе пластины, чтобы емкость кон­денсатора была равна *С =* 46 пФ?

**А9.** Воздушный конденсатор с квадратными пластинами запол­нили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε = 4. Во сколько раз нужно изменить длину пластин, чтобы ем­кость конденсатора осталась прежней?

**А10.** Пластины плоского конденсатора изолированы друг от друга слоем диэлектрика. Конденсатор заряжен до разности потенциалов *U*1 *=* 1 кВ и отключен от источника напряжения. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если при его удалении разность потенциа­лов между пластинами конденсатора возрастает до *U*2 = 3 кВ.

**А11.** Плоский конденсатор, обкладки которого велики по сравнению с расстоянием между ними, присоединен к источнику постоянного на­пряжения. Изменится ли напряженность электрического поля внутри конден­сатора, если заполнить пространство между обкладками диэлектриком?

**А12.** Плоский воздушный конденсатор заряжен до некоторой разности потенциалов. В конденсатор вдвинули (рис. 3.8) диэлектрическую пластину. После этого для восстановления прежней разности потенциалов пришлось увеличить заряд пластины в 3 раза. Определить диэлектрическую проницаемость пластины.

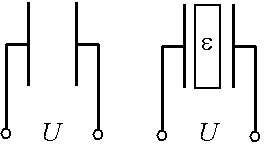
****

Рис. 3.8

**А13.** Конденсатор отключили от аккумулятора, после чего расстояние между пластинами уменьшили в 2 раза. Как изменились за­ряд, напряженность поля и разность потенциалов между пластинами?

**А14.** Плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого *d*1 = 5 см, заряжен до *U*1 = 200 В и отключен от источника напряжения. Каким будет напря­жение на конденсаторе, если его пластины раздвинуть до расстояния *d*2 = 10 см?

**А15.** Конденсатор подключен к аккумулятору. Расстояние между пластинами конденсатора уменьшили в 2 раза. Изменилась ли раз­ность потенциалов между пластинами? напряженность поля между пластинами? заряд конденсатора?

**А16.** Напряженность поля между пластинами плоского воздушного конденсатора, подключенного к источнику напряжения, равна *Е =* = 2⋅104 В/м. Какой станет напряженность при увеличении расстояния между пластинами конденсатора вдвое?

**А17.** С какой силой притягиваются друг к другу обкладки плоского конденсатора, если площадь обкладок *S* и заряд конденсатора *q*?

**А18.** Пластины плоского воздушного конденсатора имеют заря­ды +*q* и –*Q*. Как изменится сила взаимодействия этих пластин, если расстояние между ними увеличить в три раза?

**А19.** Рассчитать, с какой силой *F* притягиваются друг к другу пластины заряженного плоского конденсатора, емкость которого равна *С*, а разность потенциалов *U*. Расстояние между пластинами *d*.

**А20.** С какой силой взаимодействуют пластинки плоско­го конденсатора площадью *S* = 0,010 м2, если разность по­тенциалов между ними *U* = = 500 В и расстояние *d* = 3,0 мм?

***Задачи средней трудности***

**В1.** Конденсатор подключен к источни­ку напряжения. 1. Разрядится ли конденса­тор, если отсоединить любую обкладку от ис­точника? отсоединить обе обкладки от ис­точника? заземлить одну из обкладок, от­ключив конденсатор от источника? отклю­чив конденсатор от источника, замкнуть про­водником его обкладки? 2. Почему следует осторожно обращаться и с обесточенными це­пями, в которых имеются конденсаторы?

**В2.** Плоский конденсатор состоит из двух прямоугольных пластин, имеющих каждая длину *а* = 0,20 м и ширину *b* = 0,10 м. Расстояние между пластинами *d* = 2,0⋅10–3 м. Какой наибольший заряд можно сообщить конденсатору, если допустимая разность потенциалов не более *U =* 3,0⋅103 В, а диэлектриком является слюда (ε = 6,0)?

**В3.** Площадь пластины плоского воздушного конден­сатора *S* = 60 см2, заряд конденсатора *q =* 1,0 нКл, разность по­тенциалов между его пластинами *U =* 90 В. Определить рас­стояние между пластинами конденсатора.

**В4.** В плоском конденсаторе в качестве диэлектрика взята стеклянная пластинка толщиной *d =* 15 мм. Конденсатор зарядили до *U =* 200 В, отключили от источника напряжения, после чего удалили стеклянную пластинку. Как и насколько изменилась разность потенциалов на пластинах конденсатора? Относительную диэлектрическую проницаемость стекла принять равной ε = 7,5.

**В5**. Расстояние между пластинами плоского конденса­тора *d =* 10 мм, разность потенциалов *U =* 10 кВ. В промежуток между пластинами вдвинули пластину слюды, размеры которой равны размерам конденсатора. Определить поверхностную плотность поляризационногозаряда на поверхности слюды, полагая, что пластины все время присоединены к источнику тока (ε = 7,0).

**В6.** Решить задачу В5, предполагая, что конденсатор предварительно заряжен, затем отключен от источника и после этого в него была вдвинута пластина слюды.

**В7.** Конденсатор емкости *С* присоединен к источнику тока, который поддерживает на обкладках конденсатора разность потенциалов *V*. Какой заряд пройдет через источник при заполнении пространства между пластинами жидкостью с диэлектрической проницаемостью ε?

**В8.** Плоский конденсатор, между обкладками которого нахо­дится пластинка из диэлектрика, присоединен к аккумулятору. За­ряд конденсатора равен *Q*, а диэлектрическая проницаемость мате­риала пластинки равна ε. Какой заряд пройдет через аккумулятор при удалении пластинки?

**В9.** Плоский воздушный конденсатор зарядили до разности потенциалов *V*0 = 200 В. Затем конденсатор отклю­чили от источника тока. Какой станет разность потенциалов между пластинами, если расстояние между ними уве­личить от *d*0 = 0,20 мм до *d* = 0,70 мм, а пространство между пластинами заполнить слюдой (диэлектрическая проницаемость ε = 7,0)?

**В10.** Пластины плоского конденсатора раздвигаются один раз будучи все время подключенными к источнику напряжения, другой раз – отключенными после первоначальной зарядки. В каком из двух случаев нужно затратить на раздвигание пластин бόльшую работу?

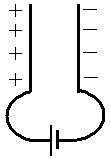


Рис. 3.9

**В11.** Пластины конденсатора присоединены к гальваническому элементу (рис. 3.9). Как изменит­ся сила взаимодействия, если их поместить в не­проводящую жидкость с диэлектрической проница­емостью ε = 3?

**В12.** Определить силу, с которой притягиваются друг к другу пластины плоского конденсатора, если источник тока, зарядивший конденсатор до разности потенциалов *U =* 1000 В, отсоединен. Площадь пластин *S =* 100 см2, расстояние между пластинами *d =* 1,0 мм. Изменится ли сила взаимодействия пластин, если источник тока будет постоянно подсоединен к пластинам?

**В13**. Одна пластина плоского воздушного конденса­тора закреплена неподвижно, вторая подвешена на пружине жесткости *k*. Площадь пластин равна *S*. На сколько удли­нится пружина, если конденсатору сообщить заряд *Q*?

**В14.** Емкость плоского воздушного конденсатора равна *С*. Одна из его обкладок имеет заряд *Q*, а другая не заряжена. Какова разность потенциалов между обкладками конденсатора?

**В15.** На одной из пластин плоского конденсатора емкости *С* находится заряд *q*1 = +*q*, а на другой *q*2 = + 4*q*. Определить разность потенциалов между пластинами конденсатора.

***Задачи трудные***

**С1.** Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено двумя слоями диэлектриков: слоем стекла толщиной *d*1 = 1,00 см и слоем парафина толщиной *d*2 = 2,00 см. Разность потенциалов между обкладками равна *U* = 3000 В. Определить напряженность поля *Е* и падение потенциала в каждом из слоев. Диэлектричес­кая проницаемость стекла ε1 = 7,00, парафина ε2 = 2,00.

**С2.** Два электропроводящих поршня площади *S* образу­ют в непроводящей трубке плоский конденсатор, заполненный воздухом при атмосферном давлении *р*0. Во сколько раз изменится расстояние между поршнями, если их зарядить разноименными зарядами *q* и –*q*? Температуру воздуха считать постоянной. Трением пренебречь.

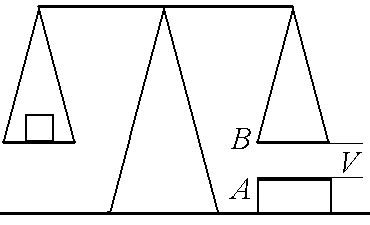


Рис. 3.10

**С3.** У расположенного горизонтально незаряженного плоского воздушного конденсатора нижняя пластина *А* закреплена, а верхняя *В* подвешена к коромыслу рычажных весов (рис. 3.10). Весы находятся в равновесии, когда расстояние между пластинами *d* = 1 мм. Как нужно изменить нагрузку второй чашки весов, чтобы сохранить равновесие при том же расстоянии между пластинами, если конденсатор зарядить до разности потенциалов *U* = 1000 В? Площадь пластины конденсатора *S* = 50 см2.

**С4.** Пластины изолированного плоского конденса­тора раздвигают так, что емкость его меняется от *С*1 до *С*2 (*C*1 > *C*2). Какую работу на это затратили, если заряд конденсатора *q*? Поле между пластинами все время остается однородным.

**С5.** Обкладки плоского конден­сатора замкнуты на гальванометр (рис. 3.11). Одна из обкладок заземлена. Между обкладками вводят положительный заряд. Что покажет гальванометр?

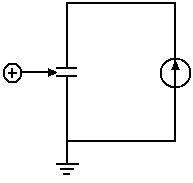
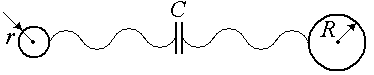


Рис. 3.11

**С6.** Плоский конденсатор находится во внешнем однород­ном электрическом поле напряженности *Е = =* 1⋅103 В/м, перпендикулярном пластинам. Площадь пластин конденсатора *S* = 1,0⋅10–2 м2. Какие заряды окажутся на каждой из пластин, если конденсатор замкнуть проводником накоротко? Пластины конденсатора до замыкания не заряжены. Влиянием силы тяжести пренебречь.

**С7.** Два проводящих шара с радиусами *r* и *R* рас­положены далеко друг от друга и соединены с обкладками конденсатора емкости *С* (рис. 3.12). Шару радиуса *r*, отсо­единив его от обкладки, сообщили заряд *Q*, а после зарядки снова присоединили. Какой заряд оказался на другом шаре? Емкостью проводов пренебречь.

Рис. 3.12 

**С8.** В плоском конденсаторе одна обкладка имеет заряд +*Q*1, а другая +*Q*2. Внутрь конденсатора параллельно обкладкам помещают незаряженную металлическую пластину (рис. 3.13). Какой заряд будет индуцирован на левой и правой поверхностях пластины?

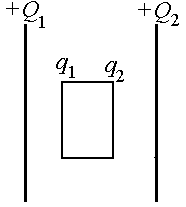


Рис. 3.13

***Задачи очень трудные***

**D1**. В открытом стеклянном цилиндре с площадью сече­ния *S* = = 100 см2 газ заполняет объем *V* = 0,050 л между двумя подвижными металлическими поршнями, подключенными к источнику напряжения *U* = = 200 В. Определить заряд *q*, кото­рый пройдет через источник при нагревании газа от *t*1 = 20 °С до *t*2 = 300 °С. Диэлектрическая проницаемость газа ε = 1,0. Внешнее давление считать постоянным. Трением пренебречь.

**D2**. Одна пластина конденсатора закреплена не­подвижно на дне широкого сосуда с жидким диэлектри­ком (диэлектрическая проницаемость его ε, плотность ρ). Вторая, имеющая вид бруска высотой *Н*, плавает над ней, погрузившись на 1/4 своего объема, если пластины не заряжены. Какую разность потенциалов надо приложить к пластинам, чтобы верхняя пластина погру­зилась наполовину? Первоначальное расстояние между пластинами конденсатора *Н*. Поле между пластинами считать однородным.

**§ 4. ЭНЕРГИЯ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА**

*Автор*: Как Вы считаете, обладает ли заряженный конденсатор электрической энергией?

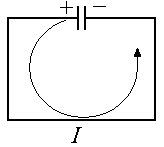


Рис. 4.1

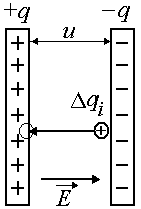
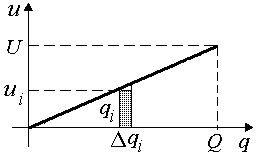
*Читатель*: Я думаю, да. Ведь если замкнуть обкладки заряженного конденсатора накоротко (рис. 4.1), то по соединительным проводам потечет ток, а значит, будет выделяться тепло до тех пор, пока конденсатор полностью не разрядится.

*Автор*: Верно! Следовательно, для того чтобы *зарядить* конденсатор, необходимо затратить энергию.

**Задача 4.1.** Вычислить энергию *W* плоского конденсатора заряда *Q*, если напряжение между его обкладками равно *U*.

|  |  |
| --- | --- |
| *Q*  *U* | ***Решение***. Энергию плоского конденсатора можно посчитать как работу внешней силы, которую надо совершить при зарядке конденсатора. Будем забирать с *отрицательно* заряженной пластины *положительные* заряды |
| *W* = ? |
|  |

маленькими порциями Δ*qi* и переносить их на положительно заряженную пластину до тех пор, пока между пластинами не установится напряжение *U* (рис. 4.2).

** Рис. 4.2  Рис. 4.3

Построим график зависимости напряжения *и* от величины заряда пластины *u*(*q*). Так как *С* = *q/u*, то *u = q/C*, т.е. напряжение линейно зависит от величины заряда (рис. 4.3). Пусть в некоторый момент времени напряжение между пластинами равно *иi*. Тогда при переносе заряда Δ*qi* внешняя сила должна совершить положительную работу Δ*Аi* = Δ*qiui.* Эта работа численно равна площади заштрихованного прямоугольника со сторонами Δ*qi* и *ui*.

Общую работу по зарядке конденсатора можно вычислить как сумму всех малых работ Δ*Аi*:

.

Эта работа вычисляется как площадь прямоугольного треугольника с катетами *U* и *Q*: . Эта работа и равна энергии заряженного конденсатора.

*Ответ*:

. (4.1)

Используя соотношения *Q* = *UС* и *U = Q/C*, получим еще два выражения для энергии конденсатора:

. (4.2)

. (4.3)

СТОП! Решите самостоятельно: А1–А5, В1, В2, С1.

**Раздвижение пластин конденсатора**

**Задача 4.2.** Изолированный воздушный конденсатор заряжен зарядом *Q*, площадь его пластин *S*, а расстояние между пластинами *d*1. Какую работу необходимо совершить внешней силой, чтобы увеличить расстояние между пластинами до величины *d*2 > *d*1?

|  |  |
| --- | --- |
| *Q*  *S*  *d*1  *d*2  *d*2 > *d*1 | ***Решение***. Работа внешней силы пойдет на увеличение энергии конденсатора, поэтому  *А* = *W*2 – *W*1 = =  . |
| *А* = ? |
|  |

*Ответ*: *А*.

*Читатель*: А нельзя ли вычислить работу непосредственно по формуле *А* = *F*эл(*d*2 – *d*1), где *F*эл – сила, с которой притягиваются пластины?

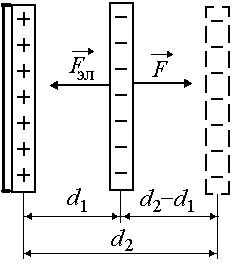


Рис. 4.4

*Автор*: Можно. Ведь чтобы раздвинуть пластины, одну из них надо закрепить, а к другой приложить силу, равную той, с которой притягиваются пластины, и переместить незакрепленную пластину на расстояние (*d*2 – *d*1) (рис. 4.4). Сила *F* с которой притягиваются пластины, равна

.

Тогда

*А* = *F*(*d*2 – *d*1) = (*d*2 – *d*1).

Как видим, мы получили тот же результат.

СТОП! Решите самостоятельно: А6, В3–В5.

**Задача 4.3.** Плоский воздушный конденсатор подключили к источнику постоянного напряжения величины *U*. Площадь пластин конденсатора *S*, расстояние между ними *d*1. Какую работу необходимо совершить *внешней* силой, чтобы уменьшить расстояние между пластинами до величины *d*2 < *d*1?

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Q*  *S*  *d*1, *d*2  *d*2 < *d*1 | ***Решение***.  *Читатель*: Так как пластины притягиваются друг к другу, то, по-моему, *никакой*  работы внешней силе вообще совершать не надо. Нужно только не мешать пластинам двигаться навстречу друг другу. | |
| *А*внеш = ? |
| 4-5  Рис. 4.5 | | *Автор*: Вы правы, но если мы не хотим, чтобы пластины при этом *разгонялись* и приобретали кинетическую энергию, надо закрепить одну из пластин, а другую *притормаживать* внешней силой так, чтобы она двигалась с постоянной скоростью:  (рис. 4.5).  *Читатель*: Тогда работа внешней силы будет отрицательной, так как  и |

вектор перемещения  () составят угол 180° (см. рис. 4.5).

*Автор*: И как же нам найти работу внешней силы?

*Читатель*: Она равна изменению энергии конденсатора:

*А*внеш = *W*2 – *W*1 = =

.

*Автор*: Но *d*2 < *d*1, значит, > 0, т.е. *А*внеш > 0! А Вы только что доказали, что *А*внеш < 0. В чем же дело?

*Читатель*: Не понимаю.

*Автор*: Вспомним, что наш конденсатор подключен к источнику напряжения, и в процессе сближения пластин напряжение поддерживается постоянным, а вот *емкость* в процессе сближения пластин *увеличивается*: *С*2 > *С*1. Следовательно, заряд на пластинах также увеличивается:

*Q*2 = *C*2*U* > *Q*1 = *C*1*U*.

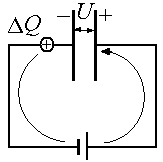


Рис. 4.6

Таким образом, источник напряжения как бы «перетащил» заряд Δ*Q = Q*2 – *Q*1 = (*C*2 – *C*1)*U* с отрицательно заряженной пластины на положительно заряженную (рис. 4.6). При этом источнику пришлось совершить работу против сил электрического поля в конденсаторе:

.

А общая работа источника напряжения и внешней силы как раз равна изменению энергии конденсатора:

*А*ист + *А*внеш = *W*2 – *W*1.

Тогда

*А*внеш = (*W*2 – *W*1) – *А*ист = =

.

Как видите, работа внешних сил действительно получилась отрицательной.

*Ответ*: .

*Читатель*: Если пластины *раздвигать*, то работа внешних сил, конечно, будет положительной, а вот какой будет работа источника?

*Автор*: Отрицательной. Ведь заряды на пластинах будут уменьшаться, следовательно, Δ*Q = Q*2 – *Q*1 < 0 и *А*ист = Δ*QU <* 0. То есть конденсатор, разряжаясь, будет передавать свою энергию источнику напряжения (аккумулятору), заряжая его.

СТОП! Решите самостоятельно: В6, С4–С6.

**Задача 4.4.** Изолированный конденсатор имеет заряд *Q*. Между его обкладками находится пластина из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε. Емкость конденсатора без пластины равна *С*. Какую работу надо совершить внешней силой, чтобы вытащить пластину из конденсатора?

|  |  |
| --- | --- |
| *Q*  *С*  ε | ***Решение***.  *Читатель*: Я не понимаю, почему для того, чтобы вытащить пластину диэлектрика из конденсатора, надо совершать работу. Ведь поле в конденсаторе *однородно*, значит, никаких сил, действующих по касательным к пластинам, быть не может. Кроме того, пластина из диэлектрика электрически нейтральна.  *Автор*: Во-первых, на краях обкладок поле *неоднородно*, а во-вторых, не надо забывать про поляризационные заряды!  Силовые линии на краях конденсатора имеют вид, показанный на рис. 4.7. Мы видим, что |
| *А*внеш = ? |
| 4-7  Рис. 4.7 |

напряженность поля там как раз имеет касательную к пластинам составляющую. И именно из-за этого на поляризационные заряды действует сила, «возвращающая» пластину в конденсатор. Поэтому чтобы вытащить пластину из конденсатора, необходимо приложить внешнюю силу.

Теперь осталось вычислить работу внешней силы. Если емкость конденсатора без диэлектрика равна *C*0, то емкость с диэлектриком ε*С*0. Тогда начальная энергия конденсатора , а конечная . Работа внешней силы равна изменению энергии конденсатора:

.

*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: А7, В7–В9, С7.

**Задача 4.5.** Воздушный конденсатор емкостью *С*0 подключен к источнику напряжения *U*. Какую работу надо совершить внешней силе, чтобы вставить в конденсатор пластину из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε?

|  |  |
| --- | --- |
| *U*  *C*0  ε | ***Решение*.** Сначала заряд на конденсаторе был равен *Q*1 = *C*0*U*. После того как вставили пластину, заряд увеличился и стал равным *Q*1 = ε*C*0*U*. Следовательно, источник совершил работу  *А*ист = *U*(*Q*2 – *Q*1) = *U*(ε*C*0*U* – *C*0*U*) = *U*2*C*0(ε – 1) > 0. |
| *А*внеш = ? |
|  |

Суммарная работа источника и внешней силы равна изменению энергии конденсатора:

*А*ист + *А*внеш = *W*2 – *W*1.

Тогда

*А*внеш = (*W*2 – *W*1) – *А*ист = 

Таким образом, работа внешней силы отрицательна: пластина *сама* будет втягиваться в конденсатор.

*Ответ*: *А*внеш.

СТОП! Решите самостоятельно: В11, В12, В14.

**Задача 4.6.** Плоский конденсатор подключен к источнику напряжения *U* (рис. 4.8). Площадь каждой пластины конденсатора *S*, расстояние между пластинами *d*1. К нижней пластине прижата металлическая пластинка той же площади *S*, толщины *d*2 и массы *т*. Металлическую пластинку отпускают. С какой скоростью она ударится о верхнюю пластину конденсатора? Силой тяжести пренебречь.

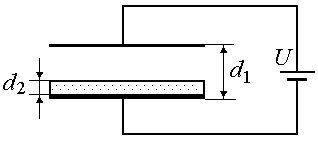


Рис. 4.8

|  |  |
| --- | --- |
| *U*  *S*  *d*1  *d*2  *m* | ***Решение*.** Если бы конденсатор не был подключен к источнику напряжения, то после того, как пластинка «подпрыгнула» и ударилась о верхнюю обкладку, конденсатор бы полностью разрядился. Однако в данном случае источник «загонит» на обкладку новые заряды +*q* и –*q* в точности равные старым: *q* = *CU*. При этом |
| *υ* = ? |

энергия конденсатора  не изменится, но источник совершит работу .

И эта работа как раз и пойдет на увеличение кинетической энергии пластинки: , тогда

.

*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: С11–С13.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

***Задачи легкие***

**А1.**  Возможно ли увеличить энергию заряженного раздвижного конденсатора, не изменяя его заряда?

**А2.** Во сколько раз изменится энергия конденсатора при увеличении напряжения на нем в 4 раза?

**А3.** Какое количество теплоты выделяется в проводнике при разряде через него конденсатора емкости *С* = 100 мкФ, заряженного до разности потенциалов *U* = 1,2 кВ?

**А4.** Конденсатору емкости *С* = 10 мкФ сообщили заряд *q* = 4,0 мкКл. Какова энергия заряженного конденсатора?

**А5.** Заряд конденсатора *q =* 3,2⋅10–3 Кл, напряжение между его обкладках *U =* 500 В. Определить энергию электрического поля конденсатора.

**А6.** Плоский изолированный конденсатор имеет емкость *С* и заряжен до разности потенциалов *U .* Какую работу надо совершить, чтобы вдвое увеличить расстояние между обкладками?

**А7.** Плоский воздушный конденсатор после зарядки отклю­чают от источника напряжения и погружают в керосин. Как изме­нится энергия, накопленная в конденсаторе?

***Задачи средней трудности***

**В1.** Площадь каждой пластины плоского конденса­тора *S =* 200 см2, а расстояние между ними *d* = 1,00 см. Какова энергия поля, если напряженность поля *Е =* 500 кВ/м?

**В2.** Как изменится энергия конденсатора, если при той же разности потенциалов между пластинами увеличить все его геометрические размеры в *k* раз? При тех же размерах увеличить заряд в *п* раз?

**В3.** Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского воздуш­ного конденсатора на *l =* 0,400 мм. Площадь каждой пластины равна *S =* 2π⋅104 мм2, заряд составляет *q =* 2,00⋅10–7 Кл.

**В4.** Плоский воздушный конденсатор емкости *С* = 1,6⋅103 пФ зарядили до разности потенциалов *U =* 500 В, отключили от источника напряжения и увеличили расстояние между пластинами в три раза. Определить разность потенциалов на пластинах конденсатора после их раздвижения и работу, совершенную внешними силами для раздвижения пластин.

**В5.** Пластины изолированного плоского конденсатора раздвигают так, что емкость его меняется от *C*1до *С*2(*C*1 > *С*2).Какую работу надо совершить при этом, если заряд конденсатора *q*? При решении учесть, что напряженность поля между пластинами равна сумме напряженностей полей от каждой из пластин в отдельности.

**В6.** Конденсатор подключен к аккумулятору. Раздвигая пластины конденсатора, мы преодолеваем силы притяжения между пластинами конденсатора и, следовательно, совершаем работу. На что затрачивается эта работа? Что происходит с энергией конденсатора?

**В7.** Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин *S* = 80 см2 каждая и расстоянием между ними *d* = 1,5 мм заряжается от источника с напряжением *U* = 100 В, отключается от него и погружается в жидкий диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ε = 2,5. Как и на сколько изменится при этом энергия конденсатора?

**В8.** Между обкладками плоского конденсатора находится пластина из диэлектрика. Емкость конденсатора равна *С*, его заряд равен *Q*, диэлектрическая проницаемость материала пластинки равна ε. Какую работу надо совершить, чтобы вытащить пластинку из конденсатора? (Трение между пластинкой и обкладками конденсатора не учитывать.)

**В9.** Между обкладками плоского конденсатора находится парафиновая пластинка. Емкость конденсатора *С* = 4,0 мкФ, его заряд *q =* 0,20 мКл. Какую работу нужно совершить, чтобы вытащить пластинку из конденсатора?

**В10.** Конденсатор емкости *С* без диэлектрика имеет заряд *q.* Какое количество теплоты выделится в конденсаторе, если его заполнить веществом с диэлектрической проницаемостью ε?

**В11.** К батарее с напряжением *U* = 200 В подключили воздушный конденсатор, площадь пластин которого *S* = 12,6 см2, а рас­стояние между пластинами *d* = 1 мм. Какую работу совершит батарея при заполнении пространства между обкладками конден­сатора диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого ε = 5,5? Как при этом изменится запасенная в конденсато­ре энергия?

**В12.** Конденсатор емкости *С* подключен к батарее. Какое количество теплоты выделится в конденсаторе, если его заполнить веществом с диэлектрической проницаемостью ε? Батарея поддерживает на конденсаторе постоянную разность потенциалов *V.*

**В13.** Энергия плоского воздушного конденсатора *W*1= 2⋅10–7 Дж. Опре­делить энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектри­ческой проницаемостью ε= 2, если конденсатор:

1. отключен от источника питания;
2. подключен к источнику питания.

**В14.** Плоский конденсатор с диэлектриком (ε = 4,0) приобрел энергию *W* = 0,12 Дж от подключенного к нему источника напряжения. Определить работу внешних сил *А* по удалению диэлектрика из пространства между пластинами и работу источника *А*0.

**В15.** Плоский конденсатор имеет пластины площадью *S*, расположенные на расстоянии *d*. Пластины заряжены с поверхностной плотностью заряда +σ и –σ. Между пластинами находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε. Найти работу, которую необходимо совершить внешней силе для увеличения расстояния между пластинами в 3 раза.

***Задачи трудные***

**С1.** Батарею конденсаторов ёмкостью *С* = 4 мкФ, заряженную до напряжения *U* = 30 кВ, разряжают через спираль с большим сопротивлением, помещенную в калориметр с водой (*М* = 90 г) и льдом (*т =* 10 г) при *t*0 = 0 °С. Определить состав и температуру смеси в калориметре после разрядки батареи. Удельная теплота плавления льда λ = 0,34⋅106 Дж/кг, удельная теплоёмкость воды *с*0 = 4,2 кДж/кг⋅К (рис. 4.9).

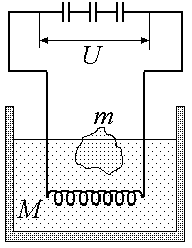


Рис. 4.9

**С2.** Напряженность поля в конденсаторе *Е*, диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε, площадь пластин *S*, начальное расстояние между пластинами *d*. Какая энергия выделится в конденсаторе, если расстояние между его пластинами увеличить в 2 раза?

**С3.** Расстояние между пластинами плоского воздуш­ного конденсатора, присоединенного к источнику напряжения *U* = 180 В равно *d*1 = = 5,0 мм. Площадь пластин конденсатора*S =* 175 см2. Найти работу по раздвижению пластин до расстояния *d*2 = 12 мм в двух случаях: 1) конденсатор перед раздвижением пластин отключен от источника; 2) конденсатор в процессе раздвижения пластин все время соединен с источником.

**С4.** Расстояние между пластинами плоского воздушно­го конденсатора, присоединенного к источнику напряжения *U*,равно *d*1,площадь пластин *S*. Найти работу по раздвижению пластин конденсатора до расстояния *d*2 *> d*l,если конденсатор в процессе раздвижения пластин соединен с источником напря­жения.

**С5.** Максимальная емкость, конденсатора настройки в радиоприемнике равна *С*1 = 100 пФ*.* Путем поворота подвижных пластин емкость конденсатора может быть уменьшена до *С*2 = 10 пФ.Предположим, что кон­денсатор заряжен до разности потенциалов *U =* 300 В,когда его емкость максимальна. Затем ручку на­стройки поворачивают, и емкость конденсатора становится минимальной. Чему равна работа внешней силы, совершенная при повороте ручки настройки?

**С6.**Расстояние между пластинами заряженного плоского конденсатора увеличивают в *п* раз. Как при этом изменяется запасенная в конденсаторе энергия? Рассмотреть случаи, когда конденсатор: а) подключен к источнику постоянного напряжения; б) отключен от источника.

**С7.** Плоский воздушный конденсатор заполнили керосином (ε =2) и зарядили, сообщив ему энергию *W*. Затемконденсатор отсоединили от источника, слили керо­син иразрядили. Какая энергия выделилась при разряде?

**С8.** Плоский конденсатор с площадью пластин *S* имеет заряд *q.* Докажитечто при раздвижении пластин на расстояние *х* нужно совершить работу, равную объему пространства, которое заполнит вновь созданное электрическое поле напряженности *Е,* умноженному на плотность энергии ε0*Е*2/2*.*

**С9.** Одна из пластин плоского конденсатора емкости *С* имеет за­ряд +*q*,а другая +5*q*. Какая энергия запасена в таком кон­денсаторе? Какие заряды следует поместить на обкладки, чтобы при той же энергии в конденсаторе электрическое поле вне его не существовало?

**C10.** Большая тонкая проводящая пластина площади *S* и толщины *d* помещена в однородное электрическое поле напряженности *Е* перпендикулярно пла­стине. Какое количество теплоты выделится в проводнике, если поле мгновенно выключить?

**С11.** Конденсатор емкостью *С* = 1,0 мФ при напряжении *U =* 1200 В применяют для импульсной стыковой сварки медной проволоки. Найти среднюю полезную мощность разряда, если он длится 1,0⋅10–6 с. КПД установки 4%.

**С12.** Плоский конденсатор находится во внешнем однород­ном электрическом поле напряженности *Е,* направление которого совпадает с направлением поля в конденсаторе. По пластинам, площадь которых равна *S*, равномерно рас­пределены заряды *q* и *–q.* Какую работу нужно совершить, чтобы перевернуть конденсатор, поменяв пластины местами? Расстояние между пластинами равно *d.* Влиянием силы тяжести пренебречь.

**С13.** Верхняя пластина плоского конденсатора площадью *S* ви­сит на пружине, жесткость которой *k.* Какую разность потенциалов нужно приложить к пластинам конденсатора, чтобы они сблизились до расстояния *d*1?Начальное расстояние между пластинами равно *d*0.

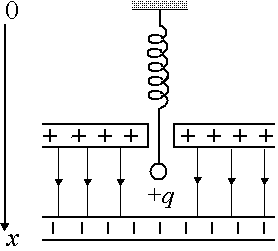
****

Рис. 4.10

**С14.** К нерастянутой вертикальной пружине, концы которой сначала закреплены, подвешивают шарик мас­сой *т,* имеющий положительный заряд *q.* Шарик нахо­дится в однородном электростатическом поле плоского конденсатора (рис. 4.10) с напряженностью *Е.* Затем ко­нец пружины освобож­дают. Найдите новое положение равновесия шарика и подсчитайте изменение энергии при переходе в это состоя­ние. Объясните резуль­тат.

***Задача очень трудная***

**D1.** Плоский конденсатор с горизонтально располо­женными пластинами подсоединен к батарее с напряжением *U* и по­мещен в сосуд, который постепенно заполняется керосином (ε = 2). Записать в виде формул и представить графичес­ки зависимости напряженности поля и потенциала в центре конденсатора от толщины слоя керосина *h* внутри него. Расстояние между пластинами конденсатора равно *d*.

**§ 5. ЗАРЯЖЕННОЕ ТЕЛО В КОНДЕНСАТОРЕ**

**Задача 5.1.**  Пылинка имеет массу *т* = 1,0⋅10–11 кг и заряд *q* = = 9,8⋅10–16 Кл. Каким должно быть расстояние между горизонтально расположенными пластинками, к которым приложена разность потенциалов *U* = 5,0⋅103 В, чтобы пылинка висела между ними?

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *т* = 1,0⋅10–11 кг  *q* = 9,8⋅10–16 Кл  *U* = 5,0⋅103 В | ***Решение*.** На пылинку действуют две силы: сила тяжести и сила со стороны электрического поля в конденсаторе  (рис. 5.1). | 5-1  Рис. 5.1 |
| *d*  = ? |
|  |

Так как пылинка неподвижна, то *mg = Eq* и *Е* = *U/d*. Подставим второе уравнение в первое и получим:

.

Подставим численные значения:

0,050 м = 5,0 см.

*Ответ*:  ≈ 5,0 см.

СТОП! Решите самостоятельно: А1, В2, C1.

**Задача 5.2.** В плоском конденсаторе электроемкостью *С* = 3,5× ×10-10 Ф, пластины которого расположены горизонтально, движется вниз заряженная капля массы *т* = 2,5⋅10–4 кг с ускорением *а* = = 1,8 м/с2. Определить заряд на пластинах конденсатора, если заряд капли *q* = 1,0⋅10–6 Кл, а расстояние между пластинами *d* = 0,1 м.

|  |  |
| --- | --- |
| *С* = 3,5⋅10-10 Ф  *т* = 2,5⋅10–4 кг  *а* = 1,8 м/с2  *q* = 1,0⋅10–6 Кл  *d* = 0,1 м | ***Решение*.** На каплю действуют две силы: сила тяжести и сила со стороны электрического поля в конденсаторе  (рис. 5.2). Равнодействующая этих сил сообщает капле ускорение *а*:  *mg – Eq = ma*, (1)  *E = U/d*, (2)  *U = Q/C*. (3)  Подставим (3) в (2) и получим , теперь подставим это значение в (1): . |
| *Q* = ? |
| 5-2  Рис. 5.2 |

Отсюда



≈ 7⋅10–9 Кл.

*Ответ*: ≈ 7⋅10–9 Кл.

СТОП! Решите самостоятельно: А3, В8, C2, С4.

**Задача 5.3.** Шарик массы *т =* 0,4 г и с зарядом *q* = 4,9 нКл подвешен на нити в поле плоского воздушного конденсатора, заряд которого *Q* = 4,43 нКл и площадь пластины *S* = 50 см2. На какой угол от вертикали отклонится при этом нить с шариком?

|  |  |
| --- | --- |
| *т =* 0,4 г = 0,4⋅10–3 кг  *q* = 4,9 нКл = 4,9⋅10–9 Кл  *Q* = 4,43 нКл = 4,43⋅10–9 Кл  *S* = 50 см2 | ***Решение*.** Так как шарик находится в покое, проекции равнодействующей на оси *х* и *у* равны нулю (рис. 5.3):  *х*: *T*sinα – *qE* = 0, (1)  *y*: *T*cosα – *mg* = 0. (2) |
| α = ? |

Учтем, что

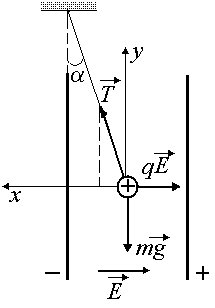


Рис. 5.3

. (3)

Подставим (3) в (1) и решим систему уравнений (1) и (2) относительно угла α:





.

*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: А4, В9, C6.

**Задача 5.4.** Внутри плоского конденсатора, к обкладкам которого приложена разность потенциалов *U* = 5 В, помещен стержень длины *l* = 5 см с двумя точечными зарядами *q* = 2⋅10–6 Кл противоположного знака. Найти максимальный момент *М* относительно центра стержня сил, действующих на стержень с зарядами, если расстояние между обкладками *d* = 10 см. Определить работу *А* сил электрического поля при повороте стержня на угол α = 90° от положения неустойчивого равновесия.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *U* = 5 В  *l* = 5 см  *q* = 2⋅10–6 Кл  *d* = 10 см  α = 90° | ***Решение*.** Положение *неустойчивого равновесия* показано на рис. 5.4. Из рисунка видно, что при малом повороте стержня около точки 0 силы электрического поля, действующие на заряды +*q* и –*q*, еще сильнее разворачивают стержень. | 5-4  Рис. 5.4 |
| *М* = ?  *А* = ? |
|  |

Когда стержень расположен параллельно пластинам конденсатора, моменты сил  и  примут максимальные значения:

, ,

а суммарный момент, вращающий стержень по часовой стрелке, будет равен

.

Подставим числовые значения:

.

Работа сил электрического поля не зависит от формы траектории, поэтому работа сил поля над положительным зарядом при повороте стержня будет точно такой же, как при перемещении заряда из точки *1* в точку *2* по двум прямолинейным отрезкам *1*0 и 0*2* (рис. 5.5).

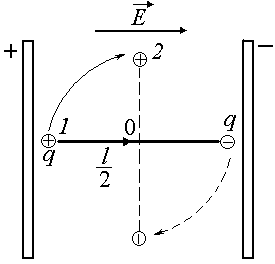


Рис. 5.5

Работа совершается только на участке *1*0 и равна .

В силу симметрии работа по перемещению отрицательного заряда точно такая же: . Отсюда общая работа равна

.

Подставим численные значения:

5 мкДж.

*Ответ*: ; 5 мкДж.

Любопытно, что в данном случае получилось, что *А = М* (размерности этих величин равны!), но физический смысл момента сил и механической работы, конечно, разный.

СТОП! Решите самостоятельно: А5, В11, В12.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

***Задачи легкие***

**А1.** Между горизонтальными пластинами заряженного плоского конденсатора находится пылинка с массой *т* = 1,0⋅10–9 ги зарядом *Q* =3,17× ×10–17 Кл. Какова напряженность поля в конденсаторе, если вес пылинки уравновешен силой воздей­ствия электрического поля на заряд пылинки?

**А2.** Пылинка массы *т* = 1,0⋅10–8 г висит между пластинами плоского воздушного конденсатора, к которому приложено напряжение *U* = 5,0 кВ. Расстояние между пластинами *d* = 5,0 см. Каков заряд пылинки?

**А3.** Капля массы *т* = 1,0⋅10–10 г и с зарядом, равным 10 зарядом электрона, поднимается вертикально вверх с ускорением *а* = 2,2 м/с2 между пластинками горизонтально расположенного плоского конденсатора. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**А4.** Маленький шарик, имеющий заряд *q =* 10нКл, подвешен на нити в пространстве плоского воздушного конденсатора, круглые пластины которого расположены горизонтально. Радиус пластины конденсатора *R = =* 10 см. Когда пластинам конденсатора сообщили заряд *Q* = 1,0 мкКл, сила натяжения нити увеличилась вдвое. Найти массу шарика.

**А5.** Внутри плоского конденсатора помещен диэлект­рический стержень длины *l* = 3 см, на концах которого имеются два точечных заряда *+q* и –*q* (|*q|* = 8 нКл). Раз­ность потенциалов между пластинами конденсатора *V =* 3 В, расстояние между пластинами *d* = 8 см. Стержень ориентирован параллельно пластинам. Найти момент сил, действующий на стержень с зарядами.

***Задачи средней трудности***

**В1.** Капелька масла радиусом *r =* 1,0 мкм,несущая на себе заряд двух электронов, находится в равновесии в поле расположенного горизонтально плоского конденсатора, когда к нему приложено напряжение *V* = 820 В. Расстояние между пластинами *d* = 8,0 мм. Плотность масла ρ = 0,80 г/см3*.* Чему равен заряд электрона?

**В2.** Заряженная капелька масла уравновешена элек­тростатическим полем горизонтально расположенного плоского конденсатора. Какое напряжение *V* подано на пластины конденсатора, если капелька при радиусе *r* = 2,0 мкм несет на себе три электрона? Расстояние между пластинами *d* = 8,0 мм.Что произойдет при раздвижении пластин в случае, когда пластины: а) соединены с источником напряжения; б) отключены? Плотность масла ρ = 0,80 г/см3.

**В3.**Положительно заряженная пылинка массы *т* = 1,0⋅10–8 г находится в равновесии внутри плоского конден­сатора, пластины которого расположены горизонтально. Между пластинами создана разность потенциалов *V*1 = 6000 В. Расстояние между пластинами *d* = 5,0 см.На какую величину необходимо изменить разность потенциа­лов, чтобы пылинка осталась в равновесии, если ее заряд уменьшился на *q*0 *=* 1000 *е*?

**В4.**Решить предыдущую задачу, считая пылинку за­ряженной отрицательно.

**В5.** Пылинка взвешена в плоском конденсаторе. Ее масса *т* = = 1,0⋅10–11 г, расстояние между пластинами конденсатора *d =* 0,50 см. Пылинка освещается ультрафиолетовым светом и, теряя заряд, выходит из равновесия. Какой заряд потеряла пылинка, если первоначально к конденсатору было приложено напряжение *U* = 154 В, а затем, чтобы опять вернуть пылинку в равновесие, пришлось прибавить Δ*U* = 8,0 В?

**В6.** В электрическое поле плоского конденсатора, пла­стины которого расположены горизонтально, помещенакапелька масла, имеющая заряд *q* = = 1 *е*. Напряженность электрического поля подобрана так, что капелька покоится. Разность потенциалов между пластинами конденсатора *V* = = 500 В, расстояние между пластинами *d* = 0,50 cм. Плотность масла ρ = = 0,90⋅103 кг/м3. Найти радиус капельки масла.

**В7**. Между горизонтально расположенными пласти­нами плоского конденсатора с высоты *Н* свободно падает незаряженный металлический шарик массы *т.* На какую высоту *h* после абсолютно упругого удара о нижнюю пла­стину поднимется шарик, если в момент удара на него переходит заряд *q*?Разность потенциалов между пласти­нами конденсатора равна *V*,расстояние между пластинами равно *d.*

**В8.** В плоском конденсаторе, помещенном в вакууме, взвешена заряженная капелька ртути. Расстояние между пластинами конденсатора *d* = = 1 см, приложенная разность потенциалов *U*1 = 1000 В. Внезапно разность потенциалов падает до *U*2 = 995 В. Через какое время капелька достигнет нижней пластины, если она первоначально находилась посередине конденсатора?

**В9.**Между вертикальными пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии *d* = 2,0 см друг от друга, висит заряженный бузиновый шарик массы *т* = 0,10 г. После того как на пластины была подана разность потенциалов *U* = 1000 В, нить с шариком отклонилась на угол α = 5,0°. Найти заряд шарика.

**В10.** Между вертикальными пластинами плоского воздушного конденсатора подвешен на нити маленький шарик, несущий заряд *q* = 10 нКл. Масса шарика *т* = 6,0 г, площадь пластины *S* = 0,10 м2. Какой заряд *Q* надо сообщить пластинам конденсатора, чтобы нить отклонилась от вертикали на угол α = 45°?

**В11.** Внутри плоского конденсатора, пластины кото­рого расположены вертикально, помещена диэлектриче­ская палочка длины *l* = 1 см с металлическими шариками на концах, несущими заряды +*q* и–*q* (*|q| = =* 1нКл). Палочка может вра­щаться без трения вокруг вертикаль­ной оси, проходящей через ее сере­дину. Разность потенциалов между пластинами конденсатора *V =* 3В, расстояние между пластинами *d* = 10 см. Какую работу необходимо совершить, чтобы повернуть палочку вокруг оси на 180° по отношению к тому положению, которое она занимает на рис. 5.6?

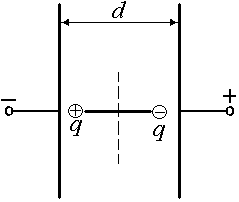


Рис. 5.6

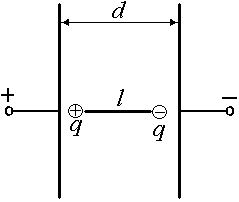


Рис. 5.7

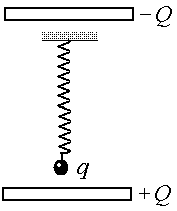


Рис. 5.8

**В12.** На концах диэлектрической палочки длины *l* = 0,50 см прикреплены два маленьких шарика, несущих заряды –*q* и *+q* (|*q*| = 10 нКл). Палочка находится между пластинами конденсатора, расстояние между которыми *d* = 10 см (рис. 5.7). При какой минимальной разно­сти потенциалов между пластинами конденсатора *V* палочка разорвется, если она выдерживает максимальную силу растяжения *F =* = 0,010 Н? Силой тяжести пренебречь.

***Задачи трудные***

**С1.** Маленький шарик подвешен на диэлектрической пружине в пространстве плоского конденсатора, пластины которого – круги радиуса *R =* 0,10 м – расположены горизонтально (рис. 5.8). Заряд шарика равен *q*= 3,0 нКл. Когда пластинам конденсатора сообщили заряд *Q =* 2,0⋅10–8 Кл, растяжение пружины увеличилось вдвое. Определить массу шарика. Мас­сой пружины пренебречь.

**С2.** Пылинка массы *т* = 1⋅10–10 г падает между вертикальными пластинами плоского конденсатора на одинаковом расстоянии от них. Из-за сопротивления воздуха скорость пылинки постоянна и равна *υ =* 0,1 см/с. Конденсатор подключают к источнику высокого напряжения *U* = 490 В, и через время *t* = 10 с пылинка достигает одной из пластин. Определите заряд пылинки. Расстояние между пластинами конденсатора *d =* 1 см. Силу сопротивления воздуха считайте пропорциональной скорости пылинки.

**С3.** Внутри плоского незаряженного конденсатора, пла­стины которого расположены горизонтально на расстоянии *d* = 1 см друг от друга, находится пылинка. Вследствие сопро­тивления воздуха пылинка падает с постоянной скоростью, так что путь от верхней пластины до нижней она проходит за время *t*0= 10 с. Когда пылинка находится у нижней пластины, на конденсатор подается напряжение *U* = 980 В. Через время *t* = 5 с после этого пылинка достигает верхней пластины. Опре­делите отношение заряда пылинки к ее массе. Силу сопротивления воздуха считать пропорциональной скорости пылинки.

**С4.** Плоский конденсатор с горизонтально расположенными пластинами помещен в вакуум; расстояние между пластинами *h* = 0,01 м;у нижней пластины находится пылинка массой *т* = 1⋅10–11 кгсо случайно возникшим зарядом. На пластины подается постоянная разность потенциалов *U* = 2000 В, причем больший потен­циал сообщается нижней пластине. При этом пылинка поднимается вверх. Определите заряд пылинки, если к верхней пластине она подходит со скоростью *υ* = 0,2 м/с,сравните его с элементарным зарядом,

**С5.** Пластины конденсатора, заряженного до напряжения *U* = 10 кВ, расположены вертикально. Расстояние между пластинами *d =* 6,0 см. Небольшой шарик массы *т =* 10 мг, несущий электрический заряд *q = –*0,40 мкКл, опускают с нуле­вой начальной скоростью вблизи отрицательно заряженной пластины (рис. 5.9). Найти работу *А*, которую совершит над шариком сила тяжести за время его движения к положительно заряженной пластине.

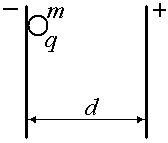


Рис. 5.9

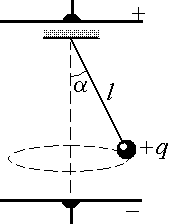


Рис. 5.10

**С6.** Внутри плоского конденсатора с напряженностью поля *Е* равномерно вращается шарик массы *т* и с зарядом +*q*, подвешенный на нити длины *l* (рис. 5.10). Угол отклонения нити от вертикали равен α. Найти силу натяжения *Т* нити и кинетическую энергию *W*кшарика.

***Задача очень трудная***

**D1.** В плоский заряженный конденсатор вносится электрический диполь из двух жестко связанных точечных зарядов +*q* и –*q*, расположенных на расстоянии *L* друг от друга. Ориентация диполя в конденсаторе показана на рис. 5.12. Какую работу надо было совершить, чтобы внести диполь в конденсатор? Площадь пластин конденсатора равна *S*, заряд конденсатора равен *Q*.

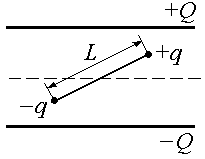


Рис. 5.12

**§ 6. ЭЛЕКТРОН В КОНДЕНСАТОРЕ**

**Задача 6.1.** Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии *d* = 2,0 см друг от друга. Разность потенциалов между ними *U* = 120 В. Какую скорость получил электрон под действием поля, пройдя по силовой линии расстояние *l* = 3,0 мм? Начальная скорость электрона равна нулю.

|  |  |
| --- | --- |
| *υ*0= 0  *d* = 2,0 см = 2,0⋅10–2 м  *U* = 120 В  *l* = 3,0 мм = 3,0⋅10–3 м | Рис. 6.1 6-1 |
| *υ* = ? |
|  |

***Решение*.** На электрон действует одна сила, равная , которая на расстоянии *l* совершает над электроном работу *А* = *еЕl* (рис. 6.1). Эта работа целиком идет на увеличение кинетической энергии электрона:

.

Отсюда

м/с.

*Ответ*: м/с.

СТОП! Решите самостоятельно: А1, В1, С1, С2.

**Задача 6.2.** Электрон влетает в плоский воздушный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью *υ* = 6,00⋅107 м/с. Расстояние между пластинами *d* = 1,00 см, разность потенциалов *U* = = 600 В. Найти отклонение электрона, вызванное полем конденсатора, если длина его пластины *l* = 5,00 см.

|  |  |
| --- | --- |
| *υ* = 6,00⋅107 м/с  *U* = 600 В  *d* = 1,00 см = 1,00⋅10–2 м  *l* = 5,00 см = 5,00⋅10–2 м | 6-2 Рис. 6.2 |
| *h* = ? |
|  |

***Решение*.** На электрон, влетевший в электрическое поле, со стороны поля действует сила *F = eE*, где *E = U/d.* Поскольку напряженность электрического поля на­правлена вверх (рис. 6.2), сила, действующая на элек­трон, направлена вниз.

Движение электрона можно рас­сматривать как суперпозицию двух независимых движе­ний, происходящих в горизонтальном и вертикальном направлениях. В горизонтальном направлении электрон по-прежнему будет двигаться равномерно, так как в этом направлении на него не действуют никакие силы. Одно­временно с этим под действием электрической силы он равноускоренно перемещается вниз. Траекторией движе­ния будет парабола. Это движение электрона в конден­саторе подобно движению тела, брошенного горизонталь­но. За время движения в конденсаторе электрон пролетит по горизонтали расстояние

*l = υt*,(1)

а по вертикали переместится вниз на расстояние

*h = at*2/2, (2)

где *а* – ускорение дви­жения.

Решая совместно уравнения (1) и (2), находим

*h = al*2/(2*υ*2). (3)

Чтобы определить ускорение, применим уравнение второго закона Ньютона. Так как на электрон в вертикальном направлении действует только одна сила *F* (силой тяжес­ти действующей на электрон, пренебрегаем), то *F* = *та,* откуда *a = F/m*, где *F = eE =.* Тогда

. (4)

Подставляя выражение (4) в (3), получаем

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (СИ)  = | м. |

*Ответ*: м.

СТОП! Решите самостоятельно: А2, В4, В5, С3, С5.

**Задача 6.3.** Пучок электронов, имеющих кинетическую энергию *Т* = 10 кэВ, влетает в плоский конденсатор по средней линии. Напряжение на конденсаторе *U* = 40 В, расстояние между пластинами *d* = 1,0 см, их длина *l* = 10 см. На расстоянии *L* = 20 см от конденсатора находится экран. Начальная скорость электро­нов параллельна пластинам. Найти смещение пучка *у* на экра­не.

|  |  |
| --- | --- |
| *Т* = 10 кэВ  *U* = 40 В  *d* = 1,0 см  *l* = 10 см  *L* = 20 см | Рис. 6.3 6-3 |
| *у* = ? |
|  |

***Решение*.** Смещение пучка электронов *у* складывается из смещения *у*1 внутри конденсатора и смещения *у*2при движении пучка от вы­хода из конденсатора до экрана (рис. 6.3). В конденсаторе на электрон действует сила *Fe = eE*, направ­ленная против силовых линий по­ля и сообщающая ему ускорение *а* = *еЕ/т*  по оси *у*. По оси *х*  движение равномерное. Тогда



.

Электрон вылетает из конденсатора под углом α к первона­чальному направлению:

tgα =  

.

После вылета из конденсатора по оси *у* электрон движется равномер­но со скоростью *υ*0sinα в течение времени . Тогда



Таким образом, общее смещение пучка *у* равно



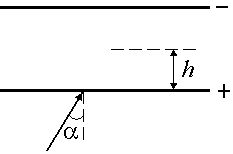
Вспомним, что 1 эВ = 1,6⋅10–19 Дж, тогда *Т* = 10 кэВ = 10⋅103× ×1,6⋅10–19 Дж = 1,6⋅10–15 Дж. Подставим численные значения:



≈ 5⋅10–3 м = 5 мм.

*Ответ*: ≈ 5 мм.

СТОП! Решите самостоятельно: В8, С8, D3.

 Рис. 6.4

**Задача 6.4.** Электрон со скоростью *υ* = 1,0⋅107 м/с влетает в пространство между пластинами плоского конденсатора, между которыми поддерживается разность потенциалов *U* = 425 В (рис. 6.4). Определить максимальное удаление *h* элек­трона от нижней пластины конденсатора. Отношение заряда электрона к его массе γ = 1,76⋅1011 Кл/кг, угол падения электронов α = 30°. Рас­стояние между пластинами *d* = 1,0 см.

|  |  |
| --- | --- |
| *υ* = 1,0⋅107 м/с  α = 30°  *U* = 425 В  *d* = 1,0 см  γ = 1,76⋅1011 Кл/кг | ***Решение*.** Напряженность поля между пластинами равна *E = U/d*. Под действием этого поля электрон в вертикальном направлении испытывает силу *F* = *еЕ* и получает ускорение  . |
| *h* = ? |
|  |

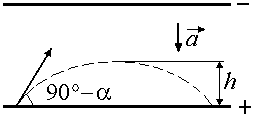


Рис. 6.5

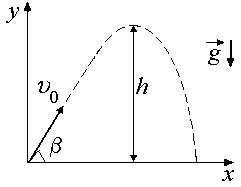


Рис. 6.6

В горизонтальном направлении (рис. 6.5) силы отсутствуют. Таким образом, движение элек­трона в пространстве между обкладками аналогично движению тела в поле тяжести земли, брошенного под углом к горизонту.

Вспомним, что если тело брошено с начальной скоростью *υ*0 под углом β к горизонту (рис. 6.6), то максимальная высота подъема равна

.

В нашем случае роль *g* играет *а* = γ*Е*, а β = (90° – α). Тогда

.

Учитывая, что *E = U/d*, а sin(90° – α) = cosα, получаем





*Ответ*: .

СТОП! Решите самостоятельно: В9, С9, D4.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

***Задачи легкие***

**а1.** Движущийся электрон в некоторый момент времени зафиксирован в середине плоского конденсатора, заряженно­го до 100 В. Определить из­менение кинетической энергии электрона в конденсаторе к мо­менту, когда электрон находится у поверхности пластины. Изме­нится ли при этом энергия конденсатора? Начальное и конечное положения электрона находятся далеко от краев пластины.

**А2.**Протон и α-частица, двигаясь с одинаковой ско­ростью, влетают в плоский конденсатор параллельно пласти­нам. Во сколько раз отклонение протона полем конденсатора будет больше отклонения α-частицы?

***Задачи средней трудности***

**В1.** Вблизи отрицательно заряженной пластины плос­кого конденсатора образовался электрон вследствие столкновения молекулы воздуха с космической частицей. С какой скоростью электрон подлетит к положительно заряженной пластине, если заряд пластины *Q =* 1 нКл, ее площадь *S =* 60 см2, расстояние между пластинами *d =* 5 мм?

**В2.** Поверхностная плотность заряда на пластинах плоского вакуумного конденсатора σ = 0,30 мкКл/м2. Пло­щадь пластины *S* =100 см2, емкость конденсатора *С* = 10 пФ. Какую скорость приобретает электрон, пройдя расстояние между пластинами конденсатора?

**B3**. Электрон, начав движение из состояния покоя и пролетев в поле плоского конденсатора расстояние между его пластинами, равное *l =* 2,0× ×10–2 м, достиг скорости *υ* = 1,0⋅107 м/с. Заряд на пластинах конденсатора равен *Q* = 5,0⋅10–9 Кл. Найти площадь пластин конденсатора. Отношение заряда электрона к его массе равно γ = 1,76⋅1011 Кл/кг.

**B4.** Электрон влетает в плоский конденсатор параллельно его пластинам на расстоянии *d* = 4 см от положительно заряженной пластины длины *l* = 15 см. Через какое время *t* электрон упадет на эту пластину, если напряженность поля конденсатора равна *Е* = 500 В/м? С какой минимальной скоростью *υ*0должен влетать электрон, чтобы не упасть на пластину? Масса электрона *т* = 9⋅10–28 г, заряд *е* = 1,6⋅10–19 Кл.

**В5.** Электрон, летящий со скоростью *υ*0, попадает в однородное поле заряженного конденсатора и вылетает из него под углом α (рис. 6.7). Найти напряженность поля конденсатора, зная длину *l*, массу электрона *т* и его заряд *е*.

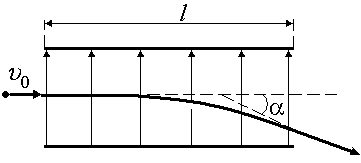


Рис. 6.7

**В6.** Внутриконденсатора, находящегося ввакууме, параллельно его горизонтальным пластинам длины *l* = 6,5 см летят электроны со скоростью *υ* = 85 000 км/с. Когда на конденсатор подается напряжение, то электроны смещаются внутри него по направлению к одной из пластин на Δ*l =* 1,8 мм. Определить на­пряженность электрического поля в конденсаторе.

**В7.** Вплоский воздушный конденсатор параллельно его пла­стинам влетает электрон со скоростью *υ*0 = 3,00⋅107 м/с; при вылете из конденсатора он смещается на Δ*у =* 1,76⋅10–3 м от своего первоначального направления. Определить отношение заряда электрона к его массе, если длина конденсатора *l =* 3,00 см, расстояние между пластинами *d* = 2,00⋅10–3 м и разность потенциалов между ними *U =* 400 В.

**В8.** Электроны, ускоренные разностью потенциалов *U*, попадают в электрическое поле отклоняющих пластин парал­лельно им, а затем попадают на экран, расположенный на расстоянии *L* от конца пластин. На какое расстояние *h* сме­стится электронный луч на экране, если на пластины, имею­щие длину *l* и расположенные на расстоянии *d* одна от другой, подать напряжение *U*п?

**В9.** В плоский конденсатор длиной *l* = 5,0 см влетает электрон под углом α = 15° к пластинам. Энергия электрона *W =* 1500 эВ. Расстояние между пластинами *d* = 1,0 см. Определить величину напряжения на конденсаторе *U*, при котором электрон при выходе из пластин будет двигаться параллельно им.

***Задачи трудные***

**С1.** Электрон, обладая на­чальной скоростью 2,0⋅106 м/с проходит в однородном элект­рическом поле плоского кон­денсатора по направлению ли­ний напряженности путь 3,0⋅10–2 м. При этом скорость электрона уменьшается. Какова электроемкость плоского конде­нсатора, если заряд на его пластинах равен 4,6⋅10–8 Кл, а расстояние между ними равно 5,0× ×10–2 м? Отношение заряда электрона к его массе 1,76⋅1011 Кл/кг.

**С2.** Одна из пластин плоского заряженного конденсатора испускает электроны с начальными скоростями *υ*,которые достигают второй пластины, имея ско­рость 4*υ*. Заряд на конденсаторе равен *q*,пло­щадь пластины *S*. На сколько нужно раздвинуть пластинки конденсатора, чтобы скорость электро­нов, достигающих второй пластины, изменилась в двараза? Изменением заряда конденсатора вследствие эмиссии пренебречь.

**С3.** Электрон влетает в плоский горизонтальный конден­сатор параллельно его пластинам со скоростью *υ* = 1,00⋅107 м/с. Напряженность поля в конденсаторе *Е =* 100 В/см, длина кон­денсатора *l* = 5,00 см. Найти величину и направление скорости электрона перед вылетом его из конденсатора.

**С4.** Электрон влетает в плоский воздушный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью *υ*0 = 1,0⋅106 м/с. Длина конденсатора *l =* 1,0 см, напряженность электрического поля в нем *Е* = 5,0⋅103 Н/Кл. Найти скорость электрона при вылете из конденсатора.

**С5.** Электрон влетает параллельно пластинам в плоский конденсатор, поле в котором *Е* = 60 В/см. Найти изменение модуля скорости электрона к моменту вылета его из конденсатора, если начальная скорость *υ*0 = = 2,0⋅107 м/с, а длина пластины конденсатора *l* = 6,0 см.

**С6.** Поток электронов, получивших свою скорость в результате прохождения разности потенциалов *V* = 5000 В,влетает в середину между пластинами пло­ского конденсатора. Какое наименьшее напряжение нужно наложить на конденсатор, чтобы электроны не вылетали из него, если размеры конденсатора таковы: длина *l* = 5 см,расстояние между пластинами *d* = 1 см?

**С7.** Ускоренный в электронной пушке пучок электронов вле­тает в пространство между пластинами плоского конденсатора параллельно пластинам и отклоняется полем конденсатора на угол α = 2,0°. Длина пластин *l* = 10 см, расстояние между ними *d* = 2,0 cм, напряжение между ними *U* = = 50 В. Каким напряжением *U*0были ускорены электроны?

**С8.**Электрон, ускоренный разностью потенциалов *V*0,пролетает между пластинами плоского конденсатора и затем попадает на экран (рис. 6.8). Расстояние между пластинами *d* много меньше длины пластин *l*, а расстояние между конденсатором и экраном *L* много больше *l*. При разности потенциалов на пластинах конденсатора *V << V*0отклонение электрона на экране пропорционально произведению *LV* и обратно пропорционально *V*0 : *х* ≈ *k*(*V/V*0)*L.* Определить коэффициент *k*.

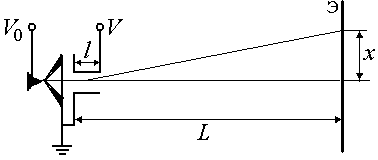


Рис. 6.8

**С9.**Частица массы *т* с зарядом *q >* 0 влетает в плоский конденсатор, обкладками которого являются металлические сетки (рис. 6.9). Напряженность поля в конденсаторе *Е,* расстояние между сетками *d.* Начальная скорость частицы *υ* составляет угол αс плоскостью первой сетки. С какой скоростью ипод каким углом к плоскости второй сетки вылетит частица из конденсатора?

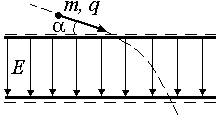


Рис. 6.9

***Задачи очень трудные***

**D1.** Одна из пластин плоского конденсатора с расстоянием между пластинами 10 ммосвещается рентге­новскими лучами, вырывающими из нее фотоэлектроны со скоростью *υ* =1,0⋅106 м/с*.* Электроны собираются на второй пластине. Через какое время фототок между пла­стинами прекратится, если с каждого квадратного сантиметра площади вырывается в 1,0 с  *п* = 1,0⋅1013 элек­тронов?

**D2**. Пластины плоского конденсатора емкости *С*,от­стоящие на расстоянии *l* друг от друга, несут заряды +*Q* и –*Q*. Электрон влетел в середину конденсатора со скоростью *υ*0, направленной параллельно пластинам. Чему равна ско­рость электрона на достаточно большом расстоянии от кон­денсатора? Каков характер изменения скорости электрона (по абсолютной величине) при его движении внутри и вне конденсатора? Рассмотреть случаи, когда электрон в на­чальный момент находится: 1) на равном расстоянии от пла­стин конденсатора; 2) на расстоянии *l*/4 от положитель­ной пластины; 3) на расстоянии *l*/4 от отрицательной пла­стины.

**D3.** Пучок ионов хлора С135 и С137, несущих каждый по одному элементарному положительному заряду, разгоняется так, что скорости ионов к моменту попада­ния пучка в пространство между пластинами плоского конденсатора одинаковы и равны *υ*0 = 1,0⋅107 см/с*.* Пучок влетает в середину конденсатора, параллельно его пла­стинам. Длина пластин *l* = 5,0 см,расстояние между ними *d* = 5,0 мм*.* Какое напряжение *V* нужно приложить между пластинами конденсатора, чтобы точки попада­ния ионов С135 и С137 отстояли на приемном экране на 0,60 ммдруг от друга? Приемный экран расположен на расстоянии *L =* 10 см от заднего края пластин конден­сатора.

**D4.**Электроны влетают в плоский конденсатор дли­ной *L* под углом α к плоскости пластин, а вылетают под углом β. Определить первоначальную кинетическую энергию *W* электронов, если напряженность поля внутри конденсатора равна *Е.*