



Всероссийская школа математики и физики «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

# Ф И З И К А

## 11

---

Экспериментальный учебник

Часть 1

*Электрическая емкость.  
Постоянный ток*

МОСКВА – 2012



Всероссийская школа математики и физики «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

# ФИЗИКА

# 11

---

Экспериментальный учебник

Часть 1

*Электрическая емкость.  
Постоянный ток*

МОСКВА – 2012

**Филатов Е.Н. Физика–11. Часть 1. Электрическая емкость. Постоянный ток.** Экспериментальный учебник для профильных физико-математических классов. – М.: ВШМФ «Авангард», 2012. – 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, 2012

© Всероссийская школа математики и физики «Авангард»,  
2007, 2012

## 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
<b>ПОСТОЯННЫЙ ТОК</b>	
§ 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

$$F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

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

$$F = \frac{F_0}{\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.1)$$

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

Т а б л и ц а 1.1

Вещество	$\epsilon$
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	$1,0 \cdot 10^4$

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  $F_1 = 3,0 \cdot 10^{-4}$  Н. С какой силой они будут взаимодействовать в этиловом спирте?

$F_1 = 3,0 \cdot 10^{-4}$  Н | **Решение.** По табл. 1.1 диэлектрическая проницаемость воды  $\epsilon_1 = 81$ , а этилового спирта  $\epsilon_2 = 27$ .

Согласно формуле (1.1)  $F_1 = \frac{F_0}{\varepsilon_1}$ ,  $F_2 = \frac{F_0}{\varepsilon_2}$ , где  $F_0$  – сила взаимодействия зарядов в вакууме. Из этих формул нетрудно получить:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \Rightarrow F_2 = F_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \frac{81}{27} \cong 9,0 \cdot 10^{-4} \text{ Н}.$$

Ответ:  $F_2 = F_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cong 9,0 \cdot 10^{-4} \text{ Н}.$

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

**Задача 1.2.** На каком расстоянии от шарика  $A$  (рис. 1.1, $a$ ), погруженного в керосин, должен быть расположен стальной шарик  $B$  объемом  $V = 9,0 \text{ мм}^3$ , чтобы он находился в равновесии? Заряд шарика  $A$  равен  $q_1 = 7,0 \text{ нКл}$ , а заряд шарика  $B$   $q_2 = -2,1 \text{ нКл}$ . Плотность керосина  $\rho_k = 0,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , плотность стали  $\rho_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

$$\begin{array}{l} V = 9,0 \text{ мм}^3 = 9,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \\ q_1 = 7,0 \text{ нКл} = 7,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ q_2 = -2,1 \text{ нКл} = -2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ \rho_k = 0,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ \rho_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ \hline r = ? \end{array}$$

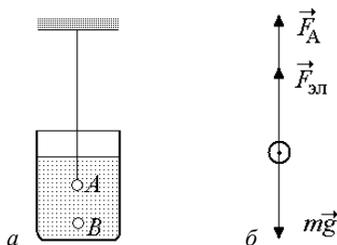


Рис. 1.1

**Решение.** На шарик  $B$  действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила Архимеда  $\vec{F}_A$  и сила Кулона  $\vec{F}_{\text{эл}}$  (рис. 1.1, $б$ ). Так как шарик  $B$  покоится, то

$$F_A + F_{\text{эл}} = mg \Rightarrow \rho_k Vg + k \frac{|q_1| |q_2|}{\varepsilon r^2} = \rho_{\text{ст}} Vg, \quad (1)$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2\text{)/Кл}^2$ ;  $\varepsilon = 2,1$  – диэлектрическая постоянная керосина по табл. 1.1. Из (1) находим  $r$ :

$$k \frac{|q_1| |q_2|}{\varepsilon r^2} = Vg(\rho_{\text{ст}} - \rho_k) \Rightarrow r^2 = \frac{k |q_1| |q_2|}{\varepsilon Vg(\rho_{\text{ст}} - \rho_k)} \Rightarrow$$

$$r = \sqrt{\frac{k |q_1| |q_2|}{\varepsilon V g (\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{к}})}} \quad (\text{СИ}) = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 7,0 \cdot 10^{-9} \cdot 2,1 \cdot 10^{-9}}{2,1 \cdot 9 \cdot 10^{-9} \cdot 9,8 \cdot (7,8 - 0,80) \cdot 10^3}} \approx$$

$$\approx 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 1,0 \text{ см.}$$

Ответ:  $r = \sqrt{\frac{k |q_1| |q_2|}{\varepsilon V g (\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{к}})}} \approx 1,0 \text{ см.}$

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.

$$\varepsilon_1 = 1$$

$$\rho_{\text{ш}}/\rho_{\text{ж}} = 3$$

$$\varepsilon_2 = ?$$

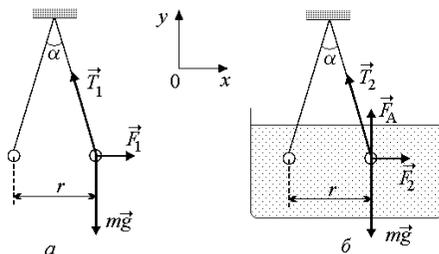


Рис. 1.2

**Решение.** В вакууме на каждой из шариков действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила натяжения нити  $\vec{T}_1$  и сила Кулона  $\vec{F}_1$  (рис. 1.2,а). В жидком диэлектрике к этим силам добавляется еще и сила Архимеда  $\vec{F}_A$ , причем сила натяжения  $\vec{T}_2$  и сила Кулона  $\vec{F}_2$  уменьшаются по величине (рис. 1.2,б).

Для первого случая справедливо

$$\vec{T}_1 + m\vec{g} + \vec{F}_1 = \vec{0}, \quad (1)$$

для второго случая

$$\vec{T}_2 + m\vec{g} + \vec{F}_2 + \vec{F}_A = \vec{0}, \quad (2)$$

Запишем уравнения (1) и (2) в проекциях на оси  $x$  и  $y$ :

$$\begin{cases} T_1 \cos \frac{\alpha}{2} - mg = 0, \\ -T_1 \sin \frac{\alpha}{2} + F_1 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_A + T_2 \cos \frac{\alpha}{2} - mg = 0, \\ -T_2 \sin \frac{\alpha}{2} + F_2 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

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

$$\begin{cases} T_1 \sin \frac{\alpha}{2} = F_1, & (5) \\ T_1 \cos \frac{\alpha}{2} = mg, & (6) \end{cases} \quad \begin{cases} T_2 \sin \frac{\alpha}{2} = F_2, & (7) \\ T_2 \cos \frac{\alpha}{2} = mg - F_A. & (8) \end{cases}$$

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

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{F_1}{mg}, \quad (9) \quad \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{F_2}{mg - F_A}. \quad (10)$$

Приравняем правые части уравнения (9) и (10)

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{mg} = \frac{F_2}{mg - F_A} &\Rightarrow \frac{k \frac{q^2}{\varepsilon_1 r^2}}{\rho_{\text{ш}} Vg} = \frac{k \frac{q^2}{\varepsilon_2 r^2}}{\rho_{\text{ш}} Vg - \rho_{\text{ж}} Vg} \Rightarrow \frac{1}{\varepsilon_1 \rho_{\text{ш}}} = \frac{1}{\varepsilon_2 (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \varepsilon_1 \rho_{\text{ш}} = \varepsilon_2 (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) \Rightarrow \varepsilon_1 \frac{\rho_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ж}}} = \varepsilon_2 \left( \frac{\rho_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 (\rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{ж}})}{(\rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{ж}}) - 1} = \frac{1 \cdot 3}{3 - 1} = 1,5. \end{aligned}$$

Ответ:  $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 (\rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{ж}})}{(\rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{ж}}) - 1} \approx 1,5$ .

СТОП! Решите самостоятельно: В3, В4, С3.

**Задача 1.4.** Металлический заряженный шар помещен в центре толстого сферического слоя, изготовленного из диэлектрика с проницаемостью  $\varepsilon = 2$  (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.

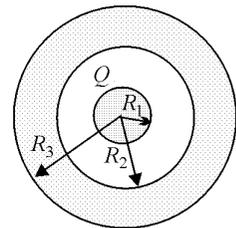


Рис. 1.3

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

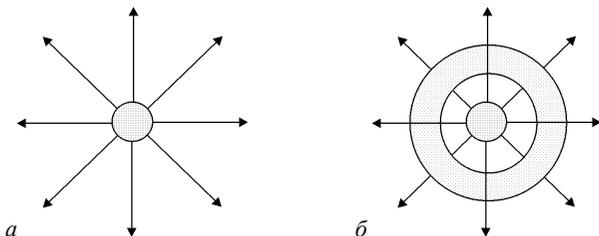
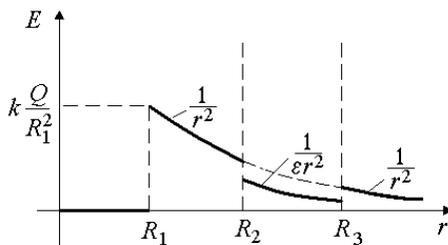


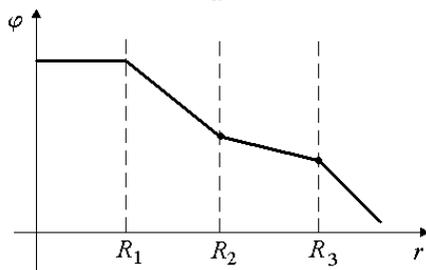
Рис. 1.4

Добавление сферического слоя из диэлектрика приведет к тому, что напряженность поля в той области, где находится диэлектрик, ослабнет в  $\varepsilon = 2$  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  $E(r)$  для случая заряженного металлического шара в отсутствии диэлектрика, а затем уменьшим величину  $E(r)$  в интервале  $(R_2, R_3)$  в 2 раза (рис. 1.5,а).



а



б

Рис. 1.5

3. График  $\varphi(r)$  будем строить, последовательно приближаясь от периферии к центру:

1) в области  $r > R_3$  величина  $E(r) = k \frac{Q}{r^2}$ , т.е. функция  $E(r)$

точно такая же, как для поля точечного заряда, поэтому  $\varphi(r) = k \frac{Q}{r}$ ;

2) в области  $R_2 < r < R_3$  на границах сферического слоя  $E(r)$  изменяется скачком, а поскольку  $E(r) = -\varphi'(r)$ , то функция  $\varphi(r)$  в точках  $r = R_3$  и  $r = R_2$  имеет изломы – скачки производной (1.5,б);

3) поскольку в области  $0 < r < R_1$  величина  $E(r) = 0$ , то  $\varphi(r) = \text{const}$ .

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

**Задача 1.5.** Сплошной эбонитовый шар ( $\epsilon = 2,7$ ) радиуса  $R = 5,0$  см несет заряд, равномерно распределенный с объемной плотностью  $\rho = 10$  нКл/м<sup>3</sup>. Определить напряженность в точках, отстоящих от центра шара на расстояниях  $r_1 = 3,0$  см и  $r_2 = 20$  см. Построить график зависимости  $E(r)$ .

$\epsilon = 2,7$   
 $R = 5,0$  см  
 $r_1 = 3,0$  см  
 $r_2 = 20$  см  
 $\rho = 10$  нКл/м<sup>3</sup>  


---

 $E(r_1) = ?$   
 $E(r_2) = ?$

**Решение.** Сначала вспомним, как выглядит график  $E(r)$  для равномерно заряженного шара при  $\epsilon = 1$ . Воспользуемся теоремой Гаусса (рис. 1.6).

Рассмотрим поток вектора напряженности через сферу радиуса  $r > R$ :

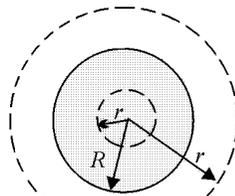


Рис. 1.6

$$\Phi = 4\pi r^2 \cdot E(r) = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow 4\pi r^2 E(r) = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r) = \frac{R^3 \rho}{3\epsilon_0 r^2}.$$

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

$$\Phi = 4\pi r^2 \cdot E(r) = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r) = \frac{r\rho}{3\epsilon_0}.$$

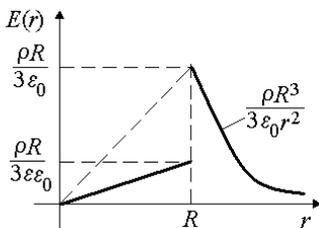


Рис. 1.7

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

$$E(r) = \frac{r\rho}{3\epsilon\epsilon_0}.$$

График  $E(r)$  показан на рис. 1.7.

Вычислим искомые значения  $E(r)$ :

$$E(r_1) = \frac{\rho r_1}{3\epsilon\epsilon_0} = \frac{10 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3 \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{3 \cdot 2,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{Н})} \approx 4,2 \text{ Н/Кл};$$

$$E(r_2) = \frac{R^3 \rho}{3\epsilon_0 r^2} = \frac{(5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м})^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3}{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{Н}) \cdot (0,20 \text{ м})^2} \approx 1,2 \text{ Н/Кл}.$$

Ответ:  $E(r_1) = \frac{\rho r_1}{3\epsilon\epsilon_0} \approx 4,2 \text{ Н/Кл}; E(r_2) = \frac{R^3 \rho}{3\epsilon_0 r^2} \approx 1,2 \text{ Н/Кл}.$

СТОП! Решите самостоятельно: С7, С8.

## Поляризация диэлектрика

*Автор:* Мы знаем, что если к *незаряженному* проводящему шару поднести *заряженное* тело, то незаряженный шарик *притягивается* к заряженному телу. Это происходит из-за явления *электростатической индукции*: заряды на проводнике под действием

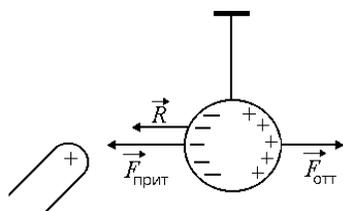


Рис. 1.8

внешнего поля перераспределяются (рис. 1.8). В результате сила притяжения  $\vec{F}_{\text{прит}}$ , действующая на отрицательные заряды, оказывается больше силы отталкивания  $\vec{F}_{\text{отт}}$ , действующей на положительные заряды. Равнодействующая этих

сил  $\vec{R} = \vec{F}_{\text{прит}} + \vec{F}_{\text{отт}}$  направлена в сторону внешнего заряда. Возникает вопрос: а будет ли притягиваться к внешнему заряду *незаряженный* шарик из диэлектрика?

*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.



Na Cl  
Рис. 1.9

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

1. Рассмотрим молекулу *полярного диэлектрика* во внешнем поле  $\vec{E}$  (рис. 1.10,а).

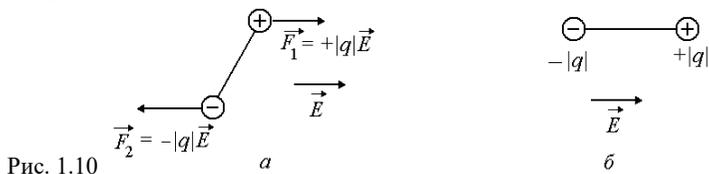


Рис. 1.10

Электрические силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  создают вращающий момент, который разворачивает молекулу так, что ее ось устанавливается параллельно вектору  $\vec{E}$  (рис. 1.10,б).

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 – от-

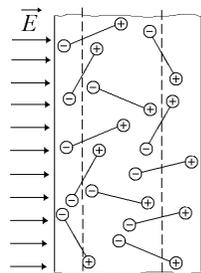


Рис. 1.11

рицательные. В результате на *поверхности* диэлектрика появляется поверхностный *связанный* заряд с определенной плотностью  $\sigma$ . *Внутри* диэлектрика отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга, и средний электрический заряд *равен нулю*.

2. Рассмотрим молекулу *неполярного диэлектрика* во внешнем поле  $\vec{E}$  (рис. 1.12). Под действием внешнего поля неполярные

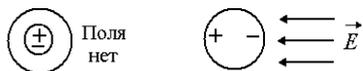


Рис. 1.12

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).

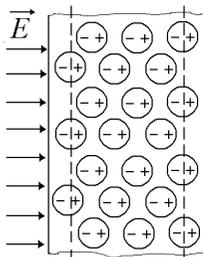


Рис. 1.13

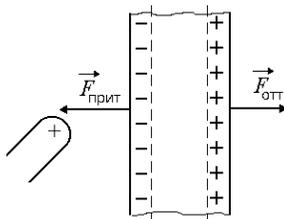


Рис. 1.14

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

### Почему внешнее поле в диэлектрике ослабляется?

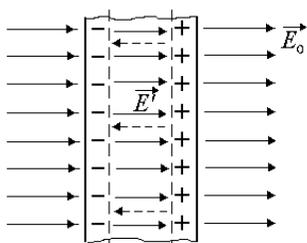


Рис. 1.15

Дело в том, что связанные поверхностные заряды создают электрическое поле напряженностью  $\vec{E}'$ , направленной в диэлектрике против внешнего поля  $\vec{E}_0$ . Результирующее поле в диэлектрике будет равно  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  (рис. 1.15), а так как  $\vec{E}_0 \uparrow \downarrow \vec{E}'$ , то  $|\vec{E}| = |\vec{E}_0| - |\vec{E}'| < |\vec{E}_0|$ .

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

**Задача 1.6.** Металлический шар, равномерно заряженный зарядом  $q$ , помещают в однородный изотропный безграничный ди-

электрик с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Определить поляризационный заряд на границе диэлектрика с шаром.

$q$   
 $\varepsilon$   
 $q' = ?$  | **Решение.** Поле в диэлектрике создается зарядом  $q$  и поляризационным зарядом  $q'$  (рис. 1.16). Напряженность поля в произвольной точке  $A$ , находящейся вне шара на расстоянии  $r$  от его центра, равна

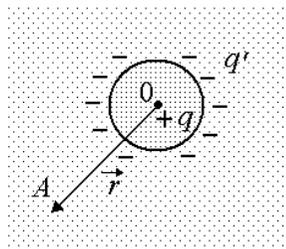


Рис. 1.16

$$E = \left( \frac{q}{r^2} - \frac{q'}{r^2} \right) \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Напряженность  $E$  связана с напряженностью  $E_0$  поля в вакууме, создаваемого зарядом  $q$ , соотношением  $E = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon r^2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ . От-

сюда имеем

$$\left( \frac{q}{r^2} - \frac{q'}{r^2} \right) \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon r^2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \Rightarrow (q - q') = \frac{q}{\varepsilon} \Rightarrow q' = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} q.$$

Ответ:  $q' = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} q$ .

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.

**A4.** 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?

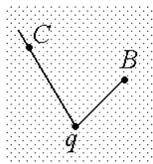


Рис. 1.17

**A5.** Электрическое поле образовано зарядом  $5,0 \cdot 10^{-7}$  Кл, находящимся в среде с относительной диэлектрической проницаемостью 2,0 (рис. 1.17). Определить разность потенциалов точек  $B$  и  $C$ , удаленных от заряда на 5,0 см и 0,20 м. Какая работа совершается полем при перемещении заряда  $0,30 \cdot 10^{-7}$  Кл между точками  $B$  и  $C$ ?

**A6.** Металлический заряженный шар окружен толстым сферическим слоем диэлектрика. Нарисовать картину силовых линий электрического поля внутри и вне диэлектрика.

**A7.** Заряженный шар «запотел», покрывшись слоем воды. Как изменилась напряженность поля внутри слоя воды и вне его?

**A8.** К шарiku заряженного электроскопа подносят, не касаясь его, незаряженное металлическое тело. Как изменяется отклонение листочков? Что будет, если поднести к заряженному шарiku кусок стекла?

### Задачи средней трудности

**B1.** 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  $\epsilon = 2,2$ .

**B2.** Сосуд с маслом, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon = 5,0$  помещен в вертикальное однородное электрическое поле. В масле находится во взвешенном состоянии алюминиевый шарик диаметром  $d = 3,0$  мм, имеющий заряд  $q = 1,0 \cdot 10^{-7}$  Кл. Определите напряженность электрического поля, если плотность алюминия  $\rho_{Al} = 2,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а масла  $\rho_m = 0,90 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**B3.** Два одинаковых заряженных шарика, подвешенных на нитях равной длины в одной точке, разошлись в воздухе на некоторый угол  $2\alpha$ .

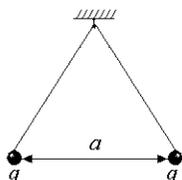


Рис. 1.18

Какова должна быть плотность  $\rho$  материала шариков, чтобы при погружении их в керосин (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2,1$ ) угол между нитями не изменился? Плотность керосина  $\rho_k = 0,80 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**B4.** Заряженные шарики, подвешенные на длинных нитях так, как показано на рис. 1.18, помещены в трансформаторное масло. Плотность материала шариков больше плотности масла  $\rho_0$ , начальное расстояние меж-

ду шариками  $a$ . Определить расстояние  $b$  между шариками после опускания их в масло. Диэлектрическая проницаемость масла  $\epsilon$ .

**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?

**В6.** Точечный заряд  $q$  находится в центре равномерно заряженного шара из диэлектрика радиусом  $R$  (рис. 1.19). Объемная плотность заряда  $\rho$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Построить графики  $E(r)$  и  $\phi(r)$ . Нарисовать картину силовых линий.

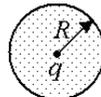


Рис. 1.19

**В7.** Точечный заряд  $q$  окружен незаряженным слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (рис. 1.20). Построить графики  $E(r)$  и  $\phi(r)$ . Нарисовать картину силовых линий.

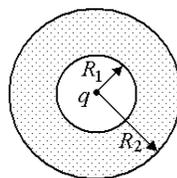


Рис. 1.20

**В8.** Металлический шар радиусом  $R = 4,0$  см заряжен до потенциала  $\phi_0 = 2,0$  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  $\epsilon = 2,0$ .

**В9.** Две тонкие металлические концентрические сферы радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ) погружены в диэлектрическую среду с проницаемостью  $\epsilon$  так, что диэлектрик проникает и в пространство между сферами. Внутренняя сфера обладает зарядом  $Q$ . Найти напряженность поля  $E$  и потенциал  $\phi$  как функцию расстояния  $r$  от центра сфер.

**В10.** Напряженность электрического поля, создаваемого однородно заряженной диэлектрической сферой радиуса  $r_0$  ( $\epsilon = 2,0$ ), изменяется при  $r < r_0$  по закону  $E = (1/3)(\rho r / \epsilon_0 \epsilon)$  в диэлектрике. При радиусе, равном  $r_0 = 5,0$  см,  $E_1 = 2,0$  В/м. Определить объемную плотность заряда  $\rho$  и зависимость  $E$  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  $\rho$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , а второй шарик имеет массу  $m$  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  $q = 4 \cdot 10^{-6}$  Кл. Нити, на которых подвешены шарики, составляют угол  $\alpha_1 = 90^\circ$ .

1. Определить массу шариков.

2. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если его плотность  $\rho = 0,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> при условии, что при погружении шариков в жидкий однородный диэлектрик угол между нитями будет  $\alpha_2 = 60^\circ$ .

**С4.** Одинаковые шарики, подвешенные на закрепленных в одной точке нитях равной длины, зарядили одинаковыми одноименными зарядами. Шарики оттолкнулись и угол между нитями стал равен  $\alpha = 60^\circ$ . После погружения шариков в жидкий диэлектрик угол между нитями уменьшился до  $\beta = 50^\circ$ . Найти диэлектрическую проницаемость среды.

Выталкивающей силой пренебречь.

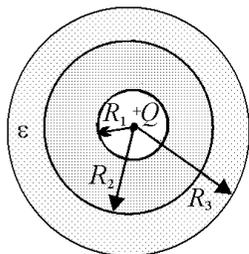


Рис. 1.21

**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, окружающе-

го шар  $d = 5,0$  см. Заряд шара  $q = 6,0 \cdot 10^{-9}$  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  $\epsilon$ . Построить графики  $E(r)$  и  $\varphi(r)$ .

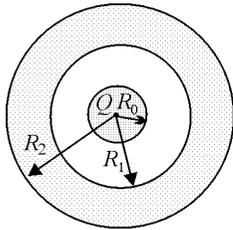


Рис. 1.22

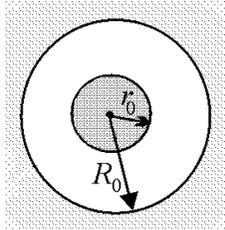


Рис. 1.23

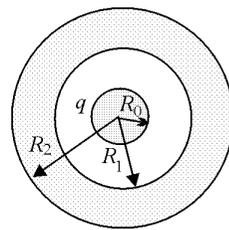


Рис. 1.24

**С8.** В пространстве, заполненном диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , 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  $\varphi(r)$ .

**С9.** Шар из диэлектрика радиуса  $R_0$  равномерно заряжен электричеством с объемной плотностью заряда  $\rho$  и окружен сферическим слоем из диэлектрика с внутренним радиусом  $R_1$  и внешним радиусом  $R_2$  (рис. 1.24). Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Построить графики  $E(r)$  и  $\varphi(r)$ .

**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?

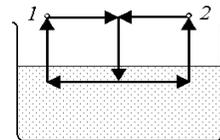


Рис. 1.25

**С11.** Две заряженные параллельные плоскости с поверхностной плотностью заряда  $\pm\sigma$ , разнесены на расстояние  $d$  друг от друга и разделены прокладкой толщины  $h$ , диэлектрическая проницаемость которой  $\epsilon$ . Найти

поверхностную плотность индуцированного поляризованного заряда на прокладке, напряженность электрического поля в пространстве между пластинами и разность потенциалов между ними.

**C12.** Две вертикально расположенные пластины заряжены так, что разность потенциалов между ними равна  $\Delta\varphi = 400$  В. Пластины погружают в масло. Какова поверхностная плотность связанных зарядов, если толщина масляного слоя  $d = 2,0$  мм?

**C13.** Проводящий шар радиуса  $r$  с зарядом  $Q$  окружен слоем диэлектрика, внешний радиус которого  $R$ . Диэлектрическая проницаемость слоя  $\epsilon$ . 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.

**C14.** Металлический шар радиуса  $R = 5,0$  см, несущий заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью  $\sigma = 2,0 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>, погружают в керосин. Определить величину и знак поляризованного 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  $\epsilon$ . 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  $\epsilon$ . В центре сфер находится точечный заряд  $+Q$ . Найти напряженность и потенциал как функцию расстояния от центра сфер, а также величину поляризованных зарядов.

## **§ 2. ЕМКОСТЬ И ЭНЕРГИЯ УЕДИНЕННОГО ПРОВОДНИКА**

### **Емкость уединенного проводника**

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

$$\varphi \sim q. \quad (2.1)$$

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

$$C = q/\varphi. \quad (2.2)$$

Величина  $C$  называется *электрической емкостью* проводника. В системе СИ  $[C] = [q]/[\varphi] = \text{Кл/В} = \text{Ф}$  (фарад). Наряду с фарадом используются также микрофарад ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ) и пикофарад ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

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

$\frac{R}{C} = ?$	<b>Решение.</b> Пусть заряд шара равен $q$ , тогда его потенциал $\varphi = k \frac{q}{R}$ , где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ в СИ и $k = 1$ в СГСЭ.
-------------------	--

Согласно формуле (2.2)

$$C = q/\varphi = q : k \frac{q}{R} = \frac{R}{k},$$

тогда

в СИ:  $C = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (2.3)$

в СГСЭ:  $C = R. \quad (2.4)$

*Ответ:*  $C = 4\pi\epsilon_0 R$  (СИ),  $C = R$  (СГСЭ).

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

**СТОП!** Решите самостоятельно: А1–А3, В2.

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

*Автор:* Чем больше  $C$ , тем больший заряд можно поместить на данный проводник. В самом деле, если при данном  $q$  величина  $C$  велика, то величина  $\varphi$  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  $\epsilon$ .

$R$   
 $\varepsilon$   
 $C = ?$  | **Решение.** Если мы поместим металлический шар в среду с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , то потенциал шара будет равен  $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}$ , а емкость

$$C = q/\varphi = q : \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R.$$

*Ответ:*  $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$ .

Итак, в среде емкость шара в  $\varepsilon$  раз больше, чем емкость такого же шара в вакууме

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R. \quad (2.5)$$

СТОП! Решите самостоятельно: А4, А5.

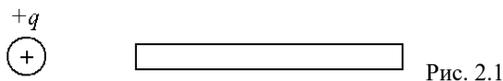
*Читатель:* Почему нельзя ввести понятия емкости диэлектрика?

*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.

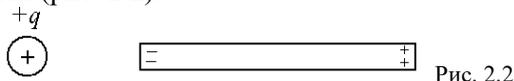
*Читатель:* А зависит ли электрическая емкость от материала проводника?

*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?



*Читатель:* Я думаю, что из-за индукции заряды на стержне перераспределятся (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  $C_1 = 6,0$  пФ и  $C_2 = 9,0$  пФ равны соответственно  $\varphi_1 = 2,0 \cdot 10^2$  В и  $\varphi_2 = 8,0 \cdot 10^2$  В. Найти суммарный заряд и потенциал проводников после соединения их проводом. Индукцией пренебречь.

$C_1 = 6,0$ пФ = $6,0 \cdot 10^{-12}$ Ф	<b>Решение.</b> До соединения справедливо $q_1 = C_1\varphi_1$ и $q_2 = C_2\varphi_2$ . Тогда общий заряд $Q = q_1 + q_2 = C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2$ , причем после соединения величина общего заряда измениться не могла.
$C_2 = 9,0$ пФ = $9,0 \cdot 10^{-12}$ Ф	
$\varphi_1 = 2,0 \cdot 10^2$ В	
$\varphi_2 = 8,0 \cdot 10^2$ В	
<hr/> $Q = ?$ $\varphi = ?$	

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} Q &= C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2 = \\ &= 6,0 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 2,0 \cdot 10^2 \text{ В} + 9,0 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 8,0 \cdot 10^2 \text{ В} \approx \\ &\approx 8,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.} \end{aligned}$$

Пусть после соединения заряды проводников стали равны  $q'_1$  и  $q'_2$ , тогда справедливы следующие соотношения:

$$q'_1 + q'_2 = Q, \quad (1)$$

$$\frac{q'_1}{C_1} = \frac{q'_2}{C_2}, \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{q'_1}{C_1} = \frac{q'_2}{C_2}. \quad (3)$$

Из формулы (2) получаем  $q'_1 = q'_2 \frac{C_1}{C_2}$ , подставим  $q'_1$  в формулу (1):

$$q'_2 \frac{C_1}{C_2} + q'_2 = Q \Rightarrow q'_2 = \frac{QC_2}{C_1 + C_2},$$

подставляя  $q'_2$  в формулу (3), находим

$$\varphi = \frac{QC_2}{C_1 + C_2} : C_2 = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2}{C_1 + C_2}.$$

Подставим численные значения:

$$\varphi = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{8,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{6,0 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 9,0 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} \approx 5,6 \cdot 10^2 \text{ В}.$$

Ответ:  $Q = C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2 \approx 8,4 \cdot 10^{-9}$  Кл;

$$\varphi = \frac{C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2}{C_1 + C_2} \approx 5,6 \cdot 10^2 \text{ В}.$$

СТОП! Решите самостоятельно: А6, В4, С3.

## Энергия уединенного проводника

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

$$\frac{Q}{U} \\ W = ?$$

**Решение.** Согласно формуле (2.2)  $C = Q/\varphi$ , откуда

$$\varphi = \frac{1}{C}q. \quad (1)$$

Тогда график зависимости потенциала  $\varphi$  от величины размещенного на проводнике заряда  $q$  имеет вид, показанный на рис. 2.3.

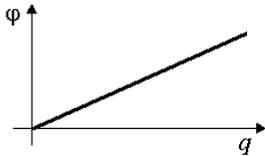


Рис. 2.2

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

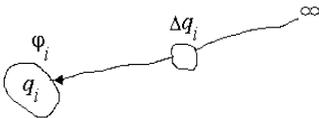


Рис. 2.4

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  $q_i$ , потенциал  $\varphi_i$ , и мы добавим ему еще маленький заряд  $\Delta q_i \rightarrow 0$  (рис. 2.4).

Для того чтобы заряд  $\Delta q_i$  перешел из бесконечности на наш уже заряженный проводник, придется совершить работу против сил электрического поля:  $\Delta A_i = \Delta q_i \phi_i$ . Эту работу можно представить графически как площадь маленького прямоугольника со сторонами  $\phi_i$  и  $\Delta q_i$  (рис. 2.5). Тогда вся работа по зарядке нашего проводника равна площади прямоугольного

$$A = \sum_i \Delta A_i = \frac{QU}{2}.$$

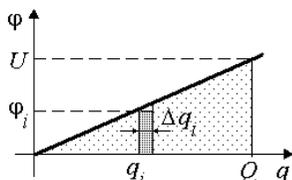


Рис. 2.5

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

*Ответ:*

$$W = \frac{QU}{2}. \quad (2.6)$$

Если в (2.6) подставить значение  $Q = CU$ , получим формулу

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (2.7)$$

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

$$W = \frac{Q^2}{2C}. \quad (2.8)$$

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

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задачи легкие

**А1.** Уединенному проводнику сообщили заряд  $1 \cdot 10^{-9}$  Кл, зарядив до потенциала 100 В. Определить емкость 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?

**A4.** Определить емкость уединенного металлического шара радиусом 10 см, если шар: находится в вакууме; опущен в воду.

**A5.** Во сколько раз изменится емкость проводящего шара радиуса  $R$ , если он сначала помещен в керосин (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_1 = 2$ ), а затем в глицерин (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_2 = 56,2$ )?

**A6.** Емкости двух металлических шаров 10 и 20 пФ, а заряды на них  $1,7 \cdot 10^{-8}$  и  $3 \cdot 10^{-8}$  Кл соответственно. Будут ли перемещаться заряды с одного шара на другой, если их соединить проволокой?

**A7.** Какое количество теплоты  $Q$  выделится при заземлении заряженного до потенциала  $\varphi = 3000$  В шара радиуса  $R = 5,0$  см?

**A8.** Какой заряд  $q$  сообщен шару, если он заряжен до потенциала  $\varphi = 100$  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?

**B2.** Шар наэлектризован так, что поверхностная плотность заряда равна  $\sigma$ . На расстоянии  $l$  от поверхности шара потенциал поля равен  $U$  вольт. Какова емкость шара?

**B3.** Проводник емкостью  $C_1 = 1,0 \cdot 10^{-5}$  мкФ заряжен до потенциала  $\varphi_1 = 6000$  В, а проводник емкостью  $C_2 = 2,0 \cdot 10^{-5}$  мкФ – до потенциала  $\varphi_2 = 12\,000$  В. Расстояние между проводниками велико по сравнению с их размерами. Какое количество тепла выделится при соединении этих проводников проволокой?

**B4.** Электрический заряд на одном шарике  $20 \cdot 10^{-8}$  Кл, а на другом  $10 \cdot 10^{-8}$  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*

**C1.** 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?

**C2.** Найти емкость шарового проводника радиусом  $r$ , окруженного прилегающим концентрическим слоем диэлектрика с внешним радиусом  $R$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

**С3.** Проводники, заряженные одинаковым количеством электричества, имеют потенциалы  $\varphi_1 = 40$  В и  $\varphi_2 = 60$  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  $C_1 = 2,0 \cdot 10^{-12}$  Ф и  $C_2 = 3,0 \cdot 10^{-12}$  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.

*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*).

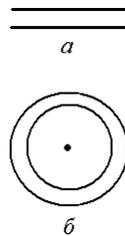


Рис. 3.1

#### 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  $Q$ :

$$U \sim Q.$$

Тогда можно записать

$$Q = CU,$$

где  $C$  – некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров проводников, их формы, расстояния между ними, а

также от свойств диэлектрика, расположенного между обкладками.

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

$$C = Q/U. \quad (3.1)$$

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

Емкости конденсаторов обычно измеряют либо в микрофарадах, либо в пикофарадах. Напомним, что  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ , а  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ .

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 ( $d^2 \ll S$ ).

$S$   
 $d$   
 $C = ?$  | **Решение.** Сообщим обкладкам заряды  $+Q$  и  $-Q$  (рис. 3.2). Тогда поверхностная плотность заряда  $\sigma = Q/S$ .

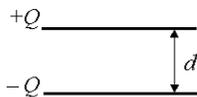


Рис. 3.2

Каждую обкладку в условиях данной задачи можно рассматривать как бесконечную заряженную плоскость. Напряженность поля бесконечной заряженной плоскости, как мы знаем, равна

$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$  и не зависит от расстояния до плоскости. Напряженность

поля каждой обкладки  $\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$  направлена, как показано на рис. 3.3.

Согласно принципу суперпозиции  $\vec{E}_{\text{общ}} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$ . Напряженность поля между обкладками равна

$$|\vec{E}_{\text{внут}}| = |\vec{E}^+| + |\vec{E}^-| = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

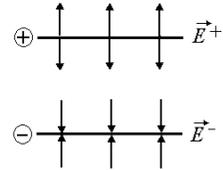


Рис. 3.3

а поле *снаружи* отсутствует, так как

$$|\vec{E}_{\text{снар}}| = |\vec{E}^+| - |\vec{E}^-| = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0.$$

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

$$U = \varphi^+ - \varphi^- = \varphi^+ - 0 = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{Q}{S\varepsilon_0} d.$$

Тогда согласно формуле (3.1) емкость конденсатора составит

$$C = \frac{Q}{U} = Q : \frac{Q}{S\varepsilon_0} d = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

*Ответ:*

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (3.2)$$

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  $\varepsilon$ ?

$S, d, \varepsilon$ $C = ?$	<b>Решение.</b> Диэлектрик ослабит поле между пластинами в $\varepsilon$ раз, поэтому напряженность поля в конденсаторе будет равна $E = \sigma/\varepsilon\varepsilon_0$ , тогда
--------------------------------	---

$$U = \varphi^+ = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} d = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0 S} d,$$

$$C = \frac{Q}{U} = Q : \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0 S} d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

Ответ:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (3.3)$$

Таким образом, введение в пространство между обкладками конденсатора диэлектрика увеличивает емкость в  $\varepsilon$  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?

$\frac{d_2}{d_1} = 2$	<b>Решение.</b> 1. Согласно формуле (3.3) $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ , по-
$C_2/C_1 = ?$	этому $\frac{C_2}{C_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2}$ , т.е. емкость уменьшилась в 2 раза.
$E_2/E_1 = ?$	
$U_2/U_1 = ?$	2. Поскольку конденсатор отключен от источника напряжения, то заряды на пластинах не могут измениться, а значит, не меняется и поверхностная плотность зарядов $\sigma$ . Так как $E = \sigma/\varepsilon_0$ , то напряженность не изменилась и $E_2/E_1 = 1$ .

3. Поскольку  $U = Ed$ , то  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{Ed_2}{Ed_1} = 2$ , т.е. напряжение возросло в 2 раза.

Ответ:  $C_2/C_1 = 1/2$ ;  $E_2/E_1 = 1$ ;  $U_2/U_1 = 2$ .

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?

$\frac{d_2}{d_1} = 2$ $C_2/C_1 = ?$ $E_2/E_1 = ?$ $U_2/U_1 = ?$	<p><b>Решение.</b> 1. Емкость никак не зависит ни от напряжения, ни от заряда, поэтому она изменилась точно так же, как и в задаче 3.3: <math>\frac{C_2}{C_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2}</math>.</p> <p>2. Поскольку конденсатор все время подключен к источнику напряжения, то напряжение на его обкладках все время постоянно, т.е. <math>U_2 = U_1</math>, или <math>U_2/U_1 = 1</math>.</p>
--	--

3. Так как  $E = \frac{U}{d}$ , то  $\frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{d_2} : \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_2} : \frac{U}{d_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2}$ , 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:*  $C_2/C_1 = 1/2$ ;  $U_2/U_1 = 1$ ;  $E_2/E_1 = 1/2$ .

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  $\epsilon$ . Как изменились емкость, напряженность поля между обкладками и напряжение?

$\frac{\epsilon}{C_2/C_1} = ?$ $E_2/E_1 = ?$ $U_2/U_1 = ?$	<p><b>Решение.</b> 1. Согласно формуле (3.3) <math>C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}</math>, поэтому емкость возрастет в <math>\epsilon</math> раз: <math>C_2/C_1 = \epsilon</math>.</p> <p>2. Поскольку <math>E = \sigma/\epsilon\epsilon_0</math>, а величина <math>\sigma</math> не изменилась, то <math>E</math> уменьшилась в <math>\epsilon</math> раз: <math>E_2/E_1 = 1/\epsilon</math>.</p> <p>3. Так как <math>U = Ed</math>, то <math>\frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2 d}{E_1 d} = \frac{1}{\epsilon}</math>, т.е. напряжение также уменьшилось в <math>\epsilon</math> раз.</p>
--	---

*Ответ:*  $C_2/C_1 = \epsilon$ ;  $E_2/E_1 = U_2/U_1 = 1/\epsilon$ .

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  $\varepsilon$ ?

$\varepsilon$	<b>Решение.</b> 1. Из условия задачи ясно, что $U = \text{const}$ , т.е.
$E_2/E_1 = ?$	
$U_2/U_1 = ?$	
$q_2/q_1 = ?$	2. Так как $E = U/d$ , то величина $E$ также не меняется: $E_2/E_1 = 1$ .

3. Поскольку  $E_1 = \sigma/\varepsilon_0$ ,  $E_2 = \sigma/\varepsilon\varepsilon_0$ , и при этом  $E_1 = E_2$ ,

то  $\frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_2}{\varepsilon\varepsilon_0} \Rightarrow \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \varepsilon$ , т.е. поверхностная плотность заряда уве-

личилась в  $\varepsilon$  раз. Так как  $q = \sigma S$ , то  $\frac{q_2}{q_1} = \frac{\sigma_2 S}{\sigma_1 S} = \varepsilon$ . Итак, величина

заряда возросла в  $\varepsilon$  раз, это увеличение «обеспечил» источник напряжения.

*Ответ:*  $q_2/q_1 = \varepsilon$ ;  $E_2/E_1 = U_2/U_1 = 1$ .

СТОП! Решите самостоятельно: B5, B7, B8.

### Сила, с которой притягиваются обкладки плоского конденсатора

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

$S$	<b>Решение.</b> Вычислим силу, с которой положительно заряженная пластина действует на отрицательно заряженную (рис. 3.4).
$\sigma$	
$F = ?$	

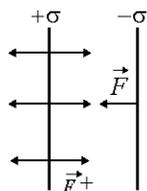


Рис. 3.4

Пусть  $\vec{E}^+$  – напряженность поля, созданного положительной пластиной, а  $Q$  – величина заряда каждой

пластины, тогда  $F = |\vec{E}^+| \cdot Q = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} (\sigma S) = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0} S$ .

*Ответ:*

$$F = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0} S. \quad (3.4)$$

СТОП! Решите самостоятельно: A17–A19, B10.

*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  $\epsilon$  раз?

*Автор:* Напряженность уменьшится только в самом диэлектрике.

Если между диэлектриком и обкладками есть хотя бы небольшой зазор, то поле  $\vec{E}^+$  в этом зазоре от введения диэлектрика никак не изменится, а значит, не изменится и сила притяжения пластин (рис. 3.5).

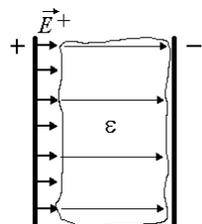


Рис. 3.5

*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.

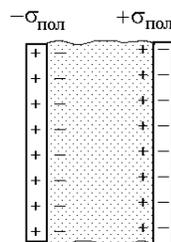


Рис. 3.6

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

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

СТОП! Решите самостоятельно: В11.

**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  $d$ .

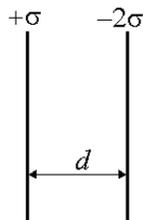


Рис. 3.7

$S, \sigma, d$	<b>Решение.</b>
$C = ?$	<i>Читатель:</i> По-моему, вопрос про емкость провокационный: она никак не зависит от того, как заряжен конденсатор, и всегда равна $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$ (если $\varepsilon = 1$ ).
$E = ?$	

*Автор:* Совершенно верно.

*Читатель:* А напряженность надо искать как суперпозицию полей

$\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$ :

$$|\vec{E}| = |\vec{E}^+| + |\vec{E}^-| = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{2\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{3\sigma}{2\varepsilon_0}.$$

*Автор:* Правильно.

*Ответ:*  $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$ ;  $E = \frac{3\sigma}{2\varepsilon_0}$ .

СТОП! Решите самостоятельно: В14, В15, С8.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задачи легкие

**A1.** Изменится ли емкость конденсатора или уединенного проводника, если увеличить их заряд в 2 раза?

**A2.** Какова емкость конденсатора, если при его зарядке до напряжения  $U = 1,4$  кВ он получает заряд  $q = 28$  нКл?

**A3.** Плоский конденсатор имеет емкость  $C = 5$  пФ. Какой заряд находится на каждой из его пластин, если разность потенциалов между ними  $V = 1000$  В?

**A4.** Емкость одного конденсатора  $C_1 = 200$  пФ, а другого  $C_2 = 1$  мкФ. Сравните заряды, накопленные на этих конденсаторах при их подключении к полюсам одного и того же источника постоянного напряжения.

**A5.** До какого напряжения нужно зарядить конденсатор емкостью  $C = 4,0$  мкФ, чтобы ему передать заряд  $q = 4 \cdot 10^{-4}$  Кл?

**A6.** В плоском конденсаторе увеличили расстояние между пластинами в 3 раза, а площадь пластин уменьшили в 2 раза. Как изменилась емкость конденсатора?

**A7.** Площадь пластины слюдяного конденсатора  $S = 15$  см<sup>2</sup>, а расстояние между пластинами  $d = 0,02$  см ( $\varepsilon = 6,0$ ). Какова емкость конденсатора?

**A8.** Площадь каждой пластины плоского конденсатора равна  $S = 520 \text{ см}^2$ . На каком расстоянии друг от друга надо расположить в воздухе пластины, чтобы емкость конденсатора была равна  $C = 46 \text{ пФ}$ ?

**A9.** Воздушный конденсатор с квадратными пластинами заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 4$ . Во сколько раз нужно изменить длину пластин, чтобы емкость конденсатора осталась прежней?

**A10.** Пластины плоского конденсатора изолированы друг от друга слоем диэлектрика. Конденсатор заряжен до разности потенциалов  $U_1 = 1 \text{ кВ}$  и отключен от источника напряжения. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если при его удалении разность потенциалов между пластинами конденсатора возрастает до  $U_2 = 3 \text{ кВ}$ .

**A11.** 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?

**A12.** 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.

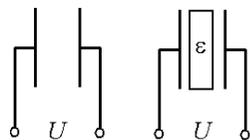


Рис. 3.8

**A13.** Конденсатор отключили от аккумулятора, после чего расстояние между пластинами уменьшили в 2 раза. Как изменились заряд, напряженность поля и разность потенциалов между пластинами?

**A14.** Плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого  $d_1 = 5 \text{ см}$ , заряжен до  $U_1 = 200 \text{ В}$  и отключен от источника напряжения. Каким будет напряжение на конденсаторе, если его пластины раздвинуть до расстояния  $d_2 = 10 \text{ см}$ ?

**A15.** Конденсатор подключен к аккумулятору. Расстояние между пластинами конденсатора уменьшили в 2 раза. Изменилась ли разность потенциалов между пластинами? напряженность поля между пластинами? заряд конденсатора?

**A16.** Напряженность поля между пластинами плоского воздушного конденсатора, подключенного к источнику напряжения, равна  $E = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . Какой станет напряженность при увеличении расстояния между пластинами конденсатора вдвое?

**A17.** С какой силой притягиваются друг к другу обкладки плоского конденсатора, если площадь обкладок  $S$  и заряд конденсатора  $q$ ?

**A18.** Пластины плоского воздушного конденсатора имеют заряды  $+Q$  и  $-Q$ . Как изменится сила взаимодействия этих пластин, если расстояние между ними увеличить в три раза?

**A19.** Рассчитать, с какой силой  $F$  притягиваются друг к другу пластины заряженного плоского конденсатора, емкость которого равна  $C$ , а разность потенциалов  $U$ . Расстояние между пластинами  $d$ .

**A20.** С какой силой взаимодействуют пластинки плоского конденсатора площадью  $S = 0,010 \text{ м}^2$ , если разность потенциалов между ними  $U = 500 \text{ В}$  и расстояние  $d = 3,0 \text{ мм}$ ?

### *Задачи средней трудности*

**B1.** 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?

**B2.** Плоский конденсатор состоит из двух прямоугольных пластин, имеющих каждая длину  $a = 0,20 \text{ м}$  и ширину  $b = 0,10 \text{ м}$ . Расстояние между пластинами  $d = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Какой наибольший заряд можно сообщить конденсатору, если допустимая разность потенциалов не более  $U = 3,0 \cdot 10^3 \text{ В}$ , а диэлектриком является слюда ( $\epsilon = 6,0$ )?

**B3.** Площадь пластины плоского воздушного конденсатора  $S = 60 \text{ см}^2$ , заряд конденсатора  $q = 1,0 \text{ нКл}$ , разность потенциалов между его пластинами  $U = 90 \text{ В}$ . Определить расстояние между пластинами конденсатора.

**B4.** В плоском конденсаторе в качестве диэлектрика взята стеклянная пластинка толщиной  $d = 15 \text{ мм}$ . Конденсатор зарядили до  $U = 200 \text{ В}$ , отключили от источника напряжения, после чего удалили стеклянную пластинку. Как и насколько изменилась разность потенциалов на пластинах конденсатора? Относительную диэлектрическую проницаемость стекла принять равной  $\epsilon = 7,5$ .

**B5.** Расстояние между пластинами плоского конденсатора  $d = 10 \text{ мм}$ , разность потенциалов  $U = 10 \text{ кВ}$ . В промежуток между пластинами вдвинули пластину слюды, размеры которой равны размерам конденсатора. Определить поверхностную плотность поляризационного заряда на поверхности слюды, полагая, что пластины все время присоединены к источнику тока ( $\epsilon = 7,0$ ).

**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  $C$  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  $\epsilon$ ?

**В8.** Плоский конденсатор, между обкладками которого находится пластинка из диэлектрика, присоединен к аккумулятору. Заряд конденсатора равен  $Q$ , а диэлектрическая проницаемость материала пластинки равна  $\epsilon$ . 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  $\epsilon = 7,0$ )?

**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 большую работу?

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

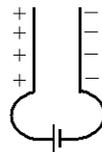


Рис. 3.9

**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  $S = 100$  см<sup>2</sup>, 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  $C$ . 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  $C$  находится заряд  $q_1 = +q$ , а на другой  $q_2 = +4q$ . 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  $E$  и падение потенциала в каждом из слоев. Диэлектрическая проницаемость стекла  $\epsilon_1 = 7,00$ , парафина  $\epsilon_2 = 2,00$ .

**С2.** Два электропроводящих поршня площади  $S$  образуют в непроводящей трубке плоский конденсатор, заполненный воздухом при атмосферном давлении  $p_0$ . Во сколько раз изменится расстояние между поршнями, если их зарядить разноименными зарядами  $q$  и  $-q$ ? Температуру воздуха считать постоянной. Трением пренебречь.

**С3.** У расположенного горизонтально незаряженного плоского воздушного конденсатора нижняя пластина  $A$  закреплена, а верхняя  $B$  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  $S = 50$  см<sup>2</sup>.

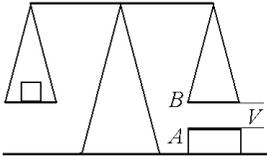


Рис. 3.10

**С4.** Пластины изолированного плоского конденсатора раздвигают так, что емкость его меняется от  $C_1$  до  $C_2$  ( $C_1 > C_2$ ). Какую работу на это затратили, если заряд конденсатора  $q$ ? Поле между пластинами все время остается однородным.

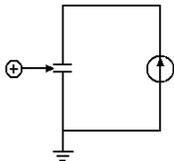


Рис. 3.11

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

**С6.** Плоский конденсатор находится во внешнем однородном электрическом поле напряженности  $E = 1 \cdot 10^3$  В/м, перпендикулярном пластинам. Площадь пластин конденсатора  $S = 1,0 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>. 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  $C$  (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.

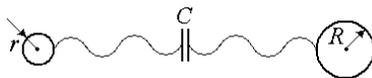


Рис. 3.12

**С8.** В плоском конденсаторе одна обкладка имеет заряд  $+Q_1$ , а другая  $+Q_2$ . Внутри конденсатора параллельно обкладкам помещают незаряженную металлическую пластину (рис. 3.13). Какой заряд будет индуцирован на левой и правой поверхностях пластины?

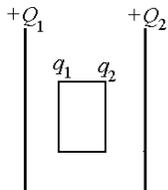


Рис. 3.13

### Задачи очень трудные

**D1.** В открытом стеклянном цилиндре с площадью сечения  $S = 100 \text{ см}^2$  газ заполняет объем  $V = 0,050 \text{ л}$  между двумя подвижными металлическими поршнями, подключенными к источнику напряжения  $U = 200 \text{ В}$ . Определить заряд  $q$ , который пройдет через источник при нагревании газа от  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Диэлектрическая проницаемость газа  $\varepsilon = 1,0$ . Внешнее давление считать постоянным. Трением пренебречь.

**D2.** Одна пластина конденсатора закреплена неподвижно на дне широкого сосуда с жидким диэлектриком (диэлектрическая проницаемость его  $\varepsilon$ , плотность  $\rho$ ). Вторая, имеющая вид бруска высотой  $H$ , плавает над ней, погружившись 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  $H$ . Поле между пластинами считать однородным.

## § 4. ЭНЕРГИЯ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

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

*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.

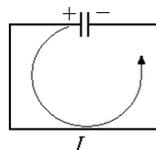


Рис. 4.1

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  $U$ .

$\frac{Q}{U}$ $W = ?$	<p><b>Решение.</b> Энергию плоского конденсатора можно посчитать как работу внешней силы, которую надо совершить при зарядке конденсатора. Будем забирать с отрицательно заряженной пластины положительные заряды маленькими порциями <math>\Delta q_i</math> и переносить их на положительно заряженную пластину до тех пор, пока между пластинами не установится напряжение <math>U</math> (рис. 4.2).</p>
--------------------------	--

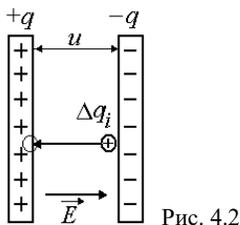


Рис. 4.2

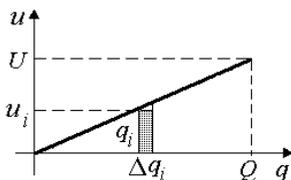


Рис. 4.3

Построим график зависимости напряжения  $u$  от величины заряда пластины  $u(q)$ . Так как  $C = q/u$ , то  $u = q/C$ , т.е. напряжение линейно зависит от величины заряда (рис. 4.3). Пусть в некоторый момент времени напряжение между пластинами равно  $u_i$ . Тогда при переносе заряда  $\Delta q_i$  внешняя сила должна совершить положительную работу  $\Delta A_i = \Delta q_i u_i$ . Эта работа численно равна площади заштрихованного прямоугольника со сторонами  $\Delta q_i$  и  $u_i$ .

Общую работу по зарядке конденсатора можно вычислить как сумму всех малых работ  $\Delta A_i$ :

$$A = \sum_i \Delta A_i = \sum_i \Delta q_i u_i .$$

Эта работа вычисляется как площадь прямоугольного треугольника с катетами  $U$  и  $Q$ :  $A = \frac{UQ}{2}$ . Эта работа и равна энергии заряженного конденсатора.

Ответ:

$$W = \frac{QU}{2} . \tag{4.1}$$

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

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (4.2)$$

$$W = \frac{Q^2}{2C}. \quad (4.3)$$

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  $d_2 > d_1$ ?

$\frac{Q}{S}$ $d_1$ $d_2$ $d_2 > d_1$ <hr style="border: 0.5px solid black;"/> $A = ?$	<p><b>Решение.</b> Работа внешней силы пойдет на увеличение энергии конденсатора, поэтому</p> $A = W_2 - W_1 = \frac{Q^2}{2C_2} - \frac{Q^2}{2C_1} = \frac{Q^2}{2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) =$ $= \frac{Q^2}{2} \left( \frac{d_2}{\epsilon_0 S} - \frac{d_1}{\epsilon_0 S} \right) = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S} (d_2 - d_1).$
--	--

Ответ:  $A = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 S} (d_2 - d_1)$ .

**Читатель:** А нельзя ли вычислить работу непосредственно по формуле  $A = F_{\text{эл}}(d_2 - d_1)$ , где  $F_{\text{эл}}$  – сила, с которой притягиваются пластины?

**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

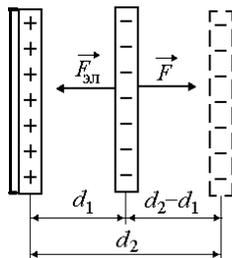


Рис. 4.4

$$F = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}(\sigma S) = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon_0} = \frac{Q^2}{2S\epsilon_0}.$$

Тогда

$$A = F(d_2 - d_1) = \frac{Q^2}{2S\epsilon_0}(d_2 - d_1).$$

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  $d_2 < d_1$ ?

$Q$   
 $S$   
 $d_1, d_2$   
 $d_2 < d_1$   
 $A_{\text{внеш}} = ?$

**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.

*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:  $\vec{F}_{\text{внеш}} = -\vec{F}_{\text{прит}}$  (рис. 4.5).

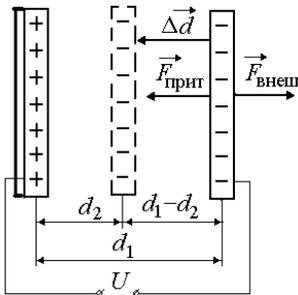


Рис. 4.5

*Читатель:* Тогда работа внешней силы будет отрицательной, так как  $\vec{F}_{\text{внеш}}$  и вектор перемещения  $\vec{\Delta d}$  ( $|\Delta \vec{d}| = d_1 - d_2$ ) составят угол  $180^\circ$  (см. рис. 4.5).

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

*Читатель:* Она равна изменению энергии конденсатора:

$$A_{\text{внеш}} = W_2 - W_1 = \frac{C_2 U^2}{2} - \frac{C_1 U^2}{2} = \frac{U^2}{2}(C_2 - C_1) =$$

$$= \frac{U^2}{2} \left( \frac{\varepsilon_0 S}{d_2} - \frac{\varepsilon_0 S}{d_1} \right) = \frac{U^2 \varepsilon_0 S}{2} \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right).$$

*Автор:* Но  $d_2 < d_1$ , значит,  $\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} > 0$ , т.е.  $A_{\text{внеш}} > 0$ ! А Вы только что

доказали, что  $A_{\text{внеш}} < 0$ . 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*:  $C_2 > C_1$ . Следовательно, заряд на пластинах также увеличивается:

$$Q_2 = C_2 U > Q_1 = C_1 U.$$

Таким образом, источник напряжения как бы «перетасил» заряд  $\Delta Q = Q_2 - Q_1 = (C_2 - C_1)U$  с отрицательно заряженной пластины на положительно заряженную (рис. 4.6). При этом источнику пришлось совершить работу против сил электрического поля в конденсаторе:

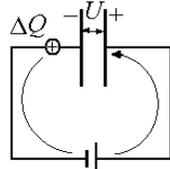


Рис. 4.6

$$A_{\text{ист}} = \Delta Q \cdot U = (C_2 - C_1)U \cdot U = U^2(C_2 - C_1) = U^2 \varepsilon_0 S \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right).$$

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

$$A_{\text{ист}} + A_{\text{внеш}} = W_2 - W_1.$$

Тогда

$$\begin{aligned} A_{\text{внеш}} &= (W_2 - W_1) - A_{\text{ист}} = \\ &= \frac{U^2}{2} (C_2 - C_1) - U^2 (C_2 - C_1) = -\frac{U^2}{2} (C_2 - C_1) = \\ &= -\frac{U^2}{2} \left( \frac{\varepsilon_0 S}{d_2} - \frac{\varepsilon_0 S}{d_1} \right) = -\frac{U^2 \varepsilon_0 S}{2} \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) < 0. \end{aligned}$$

Как видите, работа внешних сил действительно получилась отрицательной.

$$\text{Ответ: } A_{\text{внеш}} = -\frac{U^2 \varepsilon_0 S}{2} \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right).$$

*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,  $\Delta Q = Q_2 - Q_1 < 0$  и  $A_{\text{ист}} = \Delta QU < 0$ . 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  $\varepsilon$ . Емкость конденсатора без пластины равна  $C$ . Какую работу надо совершить внешней силой, чтобы вытащить пластину из конденсатора?

$$\frac{Q}{C\varepsilon} \\ A_{\text{внеш}} = ?$$

**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!

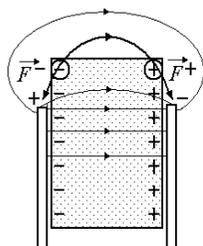


Рис. 4.7

Силловые линии на краях конденсатора имеют вид, показанный на рис. 4.7. Мы видим, что 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  $\varepsilon C_0$ . Тогда начальная энергия конденсатора  $W_1 = \frac{Q^2}{2\varepsilon C_0}$ , а

конечная  $W_2 = \frac{Q^2}{2C_0}$ . Работа внешней силы равна изменению энергии конденсатора:

$$A = W_2 - W_1 = \frac{Q^2}{2C_0} - \frac{Q^2}{2\epsilon C_0} = \frac{Q^2}{2C_0} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) > 0.$$

Ответ:  $A = \frac{Q^2}{2C_0} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right)$ .

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

**Задача 4.5.** Воздушный конденсатор емкостью  $C_0$  подключен к источнику напряжения  $U$ . Какую работу надо совершить внешней силе, чтобы вставить в конденсатор пластину из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ ?

$\frac{U}{C_0}$ $\frac{\epsilon}{A_{\text{внеш}} = ?}$	<p><b>Решение.</b> Сначала заряд на конденсаторе был равен <math>Q_1 = C_0 U</math>. После того как вставили пластину, заряд увеличился и стал равным <math>Q_2 = \epsilon C_0 U</math>. Следовательно, источник совершил работу</p>
--	--

$$A_{\text{ист}} = U(Q_2 - Q_1) = U(\epsilon C_0 U - C_0 U) = U^2 C_0 (\epsilon - 1) > 0.$$

Суммарная работа источника и внешней силы равна изменению энергии конденсатора:

$$A_{\text{ист}} + A_{\text{внеш}} = W_2 - W_1.$$

Тогда

$$\begin{aligned} A_{\text{внеш}} &= (W_2 - W_1) - A_{\text{ист}} = \\ &= \left( \frac{\epsilon C_0 U^2}{2} - \frac{C_0 U^2}{2} \right) - U^2 C_0 (\epsilon - 1) = \frac{C_0 U^2}{2} (\epsilon - 1) - C_0 U^2 (\epsilon - 1) = \\ &= -\frac{C_0 U^2}{2} (\epsilon - 1) < 0. \end{aligned}$$

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

Ответ:  $A_{\text{внеш}} = -\frac{C_0 U^2}{2} (\epsilon - 1)$ .

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

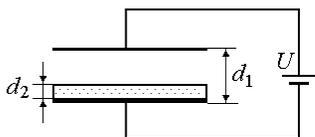


Рис. 4.8

металлическая пластинка той же площади  $S$ , толщины  $d_2$  и массы  $m$ . Металлическую пластинку отпускают. С какой скоростью она ударится о верхнюю пластину конденсатора? Силой тяжести пренебречь.

$U$	<b>Решение.</b> 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
$S$	
$d_1$	
$d_2$	
$m$	
$v = ?$	

энергия конденсатора  $W = \frac{CU^2}{2}$  не изменится, но источник совер-

шит работу  $A_{\text{ист}} = qU = (CU)U = \frac{\epsilon_0 S}{d_1 - d_2} U^2$ .

И эта работа как раз и пойдет на увеличение кинетической энергии пластинки:  $A_{\text{ист}} = \Delta K$ , тогда

$$\frac{\epsilon_0 S}{d_1 - d_2} U^2 = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v^2 = U^2 \frac{2\epsilon_0 S}{m(d_1 - d_2)}.$$

Ответ:  $v = U \sqrt{\frac{2\epsilon_0 S}{m(d_1 - d_2)}}$ .

СТОП! Решите самостоятельно: С11–С13.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задачи легкие

**A1.** Возможно ли увеличить энергию заряженного раздвижного конденсатора, не изменяя его заряда?

**A2.** Во сколько раз изменится энергия конденсатора при увеличении напряжения на нем в 4 раза?

**A3.** Какое количество теплоты выделяется в проводнике при разряде через него конденсатора емкости  $C = 100$  мкФ, заряженного до разности потенциалов  $U = 1,2$  кВ?

**A4.** Конденсатору емкости  $C = 10$  мкФ сообщили заряд  $q = 4,0$  мкКл. Какова энергия заряженного конденсатора?

**A5.** Заряд конденсатора  $q = 3,2 \cdot 10^{-3}$  Кл, напряжение между его обкладками  $U = 500$  В. Определить энергию электрического поля конденсатора.

**A6.** Плоский изолированный конденсатор имеет емкость  $C$  и заряжен до разности потенциалов  $U$ . Какую работу надо совершить, чтобы вдвое увеличить расстояние между обкладками?

**A7.** Плоский воздушный конденсатор после зарядки отключают от источника напряжения и погружают в керосин. Как изменится энергия, накопленная в конденсаторе?

### *Задачи средней трудности*

**B1.** Площадь каждой пластины плоского конденсатора  $S = 200$  см<sup>2</sup>, а расстояние между ними  $d = 1,00$  см. Какова энергия поля, если напряженность поля  $E = 500$  кВ/м?

**B2.** 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  $n$  раз?

**B3.** Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора на  $l = 0,400$  мм. Площадь каждой пластины равна  $S = 2\pi \cdot 10^4$  мм<sup>2</sup>, заряд составляет  $q = 2,00 \cdot 10^{-7}$  Кл.

**B4.** Плоский воздушный конденсатор емкости  $C = 1,6 \cdot 10^3$  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.

**B5.** Пластины изолированного плоского конденсатора раздвигают так, что емкость его меняется от  $C_1$  до  $C_2$  ( $C_1 > C_2$ ). 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  $S = 80 \text{ см}^2$  каждая и расстоянием между ними  $d = 1,5 \text{ мм}$  заряжается от источника с напряжением  $U = 100 \text{ В}$ , отключается от него и погружается в жидкий диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,5$ . Как и на сколько изменится при этом энергия конденсатора?

**В8.** Между обкладками плоского конденсатора находится пластина из диэлектрика. Емкость конденсатора равна  $C$ , его заряд равен  $Q$ , диэлектрическая проницаемость материала пластинки равна  $\varepsilon$ . 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  $C = 4,0 \text{ мкФ}$ , его заряд  $q = 0,20 \text{ мКл}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы вытащить пластинку из конденсатора?

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

**В11.** К батарее с напряжением  $U = 200 \text{ В}$  подключили воздушный конденсатор, площадь пластин которого  $S = 12,6 \text{ см}^2$ , а расстояние между пластинами  $d = 1 \text{ мм}$ . Какую работу совершит батарея при заполнении пространства между обкладками конденсатора диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon = 5,5$ ? Как при этом изменится запасенная в конденсаторе энергия?

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

**В13.** Энергия плоского воздушного конденсатора  $W_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$ . Определить энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2$ , если конденсатор:

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

**В14.** Плоский конденсатор с диэлектриком ( $\varepsilon = 4,0$ ) приобрел энергию  $W = 0,12 \text{ Дж}$  от подключенного к нему источника напряжения. Определить работу внешних сил  $A$  по удалению диэлектрика из пространства между пластинами и работу источника  $A_0$ .

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

### Задачи трудные

**С1.** Батарею конденсаторов ёмкостью  $C = 4$  мкФ, заряженную до напряжения  $U = 30$  кВ, разряжают через спираль с большим сопротивлением, помещенную в калориметр с водой ( $M = 90$  г) и льдом ( $m = 10$  г) при  $t_0 = 0$  °С. Определить состав и температуру смеси в калориметре после разрядки батареи. Удельная теплота плавления льда  $\lambda = 0,34 \cdot 10^6$  Дж/кг, удельная теплоёмкость воды  $c_0 = 4,2$  кДж/кг·К (рис. 4.9).

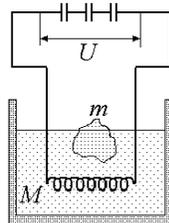


Рис. 4.9

**С2.** Напряженность поля в конденсаторе  $E$ , диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon$ , 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  $S = 175$  см<sup>2</sup>. 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  $d_2 > d_1$ , если конденсатор в процессе раздвижения пластин соединен с источником напряжения.

**С5.** Максимальная емкость, конденсатора настройки в радиоприемнике равна  $C_1 = 100$  пФ. Путем поворота подвижных пластин емкость конденсатора может быть уменьшена до  $C_2 = 10$  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  $n$  раз. Как при этом изменяется запасенная в кон-

денсаторе энергия? Рассмотреть случаи, когда конденсатор: а) подключен к источнику постоянного напряжения; б) отключен от источника.

**C7.** Плоский воздушный конденсатор заполнили керосином ( $\epsilon = 2$ ) и зарядили, сообщив ему энергию  $W$ . Затем конденсатор отсоединили от источника, слили керосин и разрядили. Какая энергия выделилась при разряде?

**C8.** Плоский конденсатор с площадью пластин  $S$  имеет заряд  $q$ . Докажите что при раздвижении пластин на расстояние  $x$  нужно совершить работу, равную объему пространства, которое заполнит вновь созданное электрическое поле напряженности  $E$ , умноженному на плотность энергии  $\epsilon_0 E^2/2$ .

**C9.** Одна из пластин плоского конденсатора емкости  $C$  имеет заряд  $+q$ , а другая  $+5q$ . 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  $E$  перпендикулярно пластине. Какое количество теплоты выделится в проводнике, если поле мгновенно выключить?

**C11.** Конденсатор емкостью  $C = 1,0$  мФ при напряжении  $U = 1200$  В применяют для импульсной стыковой сварки медной проволоки. Найти среднюю полезную мощность разряда, если он длится  $1,0 \cdot 10^{-6}$  с. КПД установки 4%.

**C12.** Плоский конденсатор находится во внешнем однородном электрическом поле напряженности  $E$ , 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.

**C13.** 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  $d_0$ .

**C14.** К нерастянутой вертикальной пружине, концы которой сначала закреплены, подвешивают шарик массой  $m$ , имеющий положительный заряд  $q$ . Шарик находится в однородном электростатическом поле плоского конденсатора (рис. 4.10) с напряженностью  $E$ . Затем конец пружины осво-

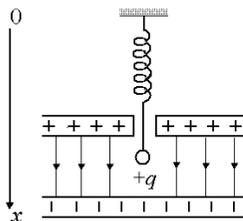


Рис. 4.10

бождают. 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 ( $\epsilon = 2$ ). 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  $m = 1,0 \cdot 10^{-11}$  кг и заряд  $q = 9,8 \cdot 10^{-16}$  Кл. Каким должно быть расстояние между горизонтально расположенными пластинками, к которым приложена разность потенциалов  $U = 5,0 \cdot 10^3$  В, чтобы пылинка висела между ними?

$$\begin{array}{l} m = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ кг} \\ q = 9,8 \cdot 10^{-16} \text{ Кл} \\ U = 5,0 \cdot 10^3 \text{ В} \\ d = ? \end{array}$$

**Решение.** На пылинку действуют две силы: сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила со стороны электрического поля в конденсаторе  $\vec{E}q$  (рис. 5.1).

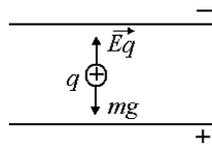


Рис. 5.1

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

$$mg = \frac{U}{d}q \Rightarrow d = \frac{Uq}{mg}$$

Подставим численные значения:

$$d = \frac{Uq}{mg} = \frac{5,0 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot 9,8 \cdot 10^{-16} \text{ Кл}}{1,0 \cdot 10^{-11} \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ Н/кг}} \approx 0,050 \text{ м} = 5,0 \text{ см.}$$

Ответ:  $d = \frac{Uq}{mg} \approx 5,0 \text{ см.}$

СТОП! Решите самостоятельно: A1, B2, C1.

**Задача 5.2.** В плоском конденсаторе электроемкостью  $C = 3,5 \times 10^{-10}$  Ф, пластины которого расположены горизонтально, движется вниз заряженная капля массы  $m = 2,5 \cdot 10^{-4}$  кг с ускорением  $a = 1,8$  м/с<sup>2</sup>. Определить заряд на пластинах конденсатора, если заряд капли  $q = 1,0 \cdot 10^{-6}$  Кл, а расстояние между пластинами  $d = 0,1$  м.

$$C = 3,5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$m = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$a = 1,8 \text{ м/с}^2$$

$$q = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$d = 0,1 \text{ м}$$

$$Q = ?$$

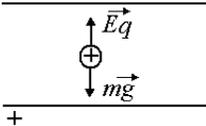


Рис. 5.2

Отсюда

$$Q = \frac{m(g-a)Cd}{q} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot (9,8 - 1,8) \text{ м/с}^2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot 0,1 \text{ м}}{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}} \approx 7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$\text{Ответ: } Q = \frac{m(g-a)Cd}{q} \approx 7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

СТОП! Решите самостоятельно: А3, В8, С2, С4.

**Задача 5.3.** Шарик массы  $m = 0,4$  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  $S = 50$  см<sup>2</sup>. На какой угол от вертикали отклонится при этом нить с шариком?

$$m = 0,4 \text{ г} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$q = 4,9 \text{ нКл} = 4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$Q = 4,43 \text{ нКл} = 4,43 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$S = 50 \text{ см}^2$$

$$\alpha = ?$$

**Решение.** Так как шарик находится в покое, проекции равнодействующей на оси  $x$  и  $y$  равны нулю (рис. 5.3):

$$x: T \sin \alpha - qE = 0, \quad (1)$$

$$y: T \cos \alpha - mg = 0. \quad (2)$$

Учтем, что

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{S\epsilon_0}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (1) и решим систему уравнений (1) и (2) относительно угла  $\alpha$ :

$$\begin{cases} T \sin \alpha = \frac{qQ}{S\epsilon_0}, \\ T \cos \alpha = mg \end{cases} \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \frac{qQ}{S\epsilon_0} : mg = \frac{qQ}{S\epsilon_0 mg} \Rightarrow$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{qQ}{S\epsilon_0 mg} \right) =$$

$$= \operatorname{arctg} \frac{4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 4,43 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ Н/кг}} \approx 7,1^\circ.$$

Ответ:  $\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{qQ}{S\epsilon_0 mg} \right) \approx 7,1^\circ.$

СТОП! Решите самостоятельно: А4, В9, С6.

**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  $q = 2 \cdot 10^{-6}$  Кл противоположного знака. Найти максимальный момент  $M$  относительно центра стержня сил, действующих на стержень с зарядами, если расстояние между обкладками  $d = 10$  см. Определить работу  $A$  сил электрического поля при повороте стержня на угол  $\alpha = 90^\circ$  от положения неустойчивого равновесия.

$U = 5$ В
$l = 5$ см
$q = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл
$d = 10$ см
$\alpha = 90^\circ$
$M = ?$
$A = ?$

**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.

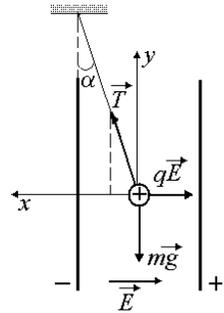


Рис. 5.3

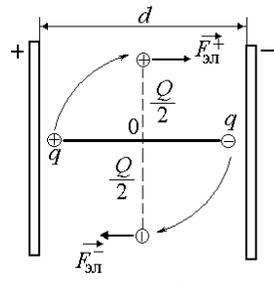


Рис. 5.4

Когда стержень расположен параллельно пластинам конденсатора, моменты сил  $\vec{F}_{\text{эл}}^+$  и  $\vec{F}_{\text{эл}}^-$  примут максимальные значения:

$$M^+ = F_{\text{эл}}^+ \frac{l}{2} = \frac{qEl}{2}, \quad M^- = F_{\text{эл}}^- \frac{l}{2} = \frac{qEl}{2},$$

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

$$M = M^+ + M^- = \frac{qEl}{2} + \frac{qEl}{2} = qEl = q \frac{U}{d} l.$$

Подставим числовые значения:

$$M = \frac{qUl}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 5 \text{ В} \cdot 0,05 \text{ м}}{0,10 \text{ м}} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

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 10 и 02 (рис. 5.5).

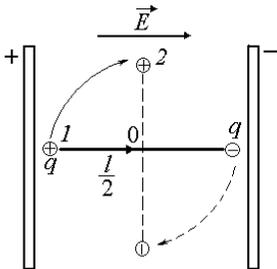


Рис. 5.5

Работа совершается только на участке

$$10 \text{ и равна } A^+ = qE \frac{l}{2} = q \frac{U}{d} \frac{l}{2} = \frac{qUl}{2d}.$$

В силу симметрии работа по перемещению отрицательного заряда точно такая же:  $A^- = \frac{qUl}{2d}$ . Отсюда общая работа равна

$$A = A^- + A^+ = \frac{qUl}{2d} + \frac{qUl}{2d} = \frac{qUl}{d}.$$

Подставим численные значения:

$$A = \frac{qUl}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 5 \text{ В} \cdot 0,05 \text{ м}}{0,10 \text{ м}} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 5 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $M = \frac{qUl}{d} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $A = \frac{qUl}{d} \approx 5 \text{ мкДж}.$

Любопытно, что в данном случае получилось, что  $A = M$  (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

**A1.** Между горизонтальными пластинами заряженного плоского конденсатора находится пылинка с массой  $m = 1,0 \cdot 10^{-9}$  г и зарядом  $Q = 3,17 \times 10^{-17}$  Кл. Какова напряженность поля в конденсаторе, если вес пылинки уравновешен силой воздействия электрического поля на заряд пылинки?

**A2.** Пылинка массы  $m = 1,0 \cdot 10^{-8}$  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?

**A3.** Капля массы  $m = 1,0 \cdot 10^{-10}$  г и с зарядом, равным 10 зарядом электрона, поднимается вертикально вверх с ускорением  $a = 2,2$  м/с<sup>2</sup> между пластинками горизонтально расположенного плоского конденсатора. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**A4.** Маленький шарик, имеющий заряд  $q = 10$  нКл, подвешен на нити в пространстве плоского воздушного конденсатора, круглые пластины которого расположены горизонтально. Радиус пластины конденсатора  $R = 10$  см. Когда пластине конденсатора сообщили заряд  $Q = 1,0$  мкКл, сила натяжения нити увеличилась вдвое. Найти массу шарика.

**A5.** 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

**B1.** 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  $\rho = 0,80$  г/см<sup>3</sup>. Чему равен заряд электрона?

**B2.** 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 пласти-

нами  $d = 8,0$  мм. Что произойдет при раздвижении пластин в случае, когда пластины: а) соединены с источником напряжения; б) отключены? Плотность масла  $\rho = 0,80$  г/см<sup>3</sup>.

**В3.** Положительно заряженная пылинка массы  $m = 1,0 \cdot 10^{-8}$  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  $q_0 = 1000 e$ ?

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

**В5.** Пылинка взвешена в плоском конденсаторе. Ее масса  $m = 1,0 \cdot 10^{-11}$  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  $\Delta U = 8,0$  В?

**В6.** В электрическое поле плоского конденсатора, пластины которого расположены горизонтально, помещена капелька масла, имеющая заряд  $q = 1 e$ . Напряженность электрического поля подобрана так, что капелька покоится. Разность потенциалов между пластинами конденсатора  $V = 500$  В, расстояние между пластинами  $d = 0,50$  см. Плотность масла  $\rho = 0,90 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Найти радиус капельки масла.

**В7.** Между горизонтально расположенными пластинами плоского конденсатора с высоты  $H$  свободно падает незаряженный металлический шарик массы  $m$ . 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  $m = 0,10$  г. После того как на пластины была подана разность потенциалов  $U = 1000$  В, нить с шариком отклонилась на угол  $\alpha = 5,0^\circ$ . Найти заряд шарика.

**В10.** Между вертикальными пластинами плоского воздушного конденсатора подвешен на нити маленький шарик, несущий заряд  $q = 10$  нКл. Масса шарика  $m = 6,0$  г, площадь пластины  $S = 0,10$  м<sup>2</sup>. Какой заряд  $Q$  надо сообщить пластинам конденсатора, чтобы нить отклонилась от вертикали на угол  $\alpha = 45^\circ$ ?

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

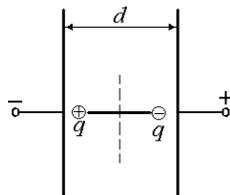


Рис. 5.6

**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.

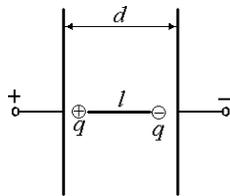


Рис. 5.7

### 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  $Q = 2,0 \cdot 10^{-8}$  Кл, растяжение пружины увеличилось вдвое. Определить массу шарика. Массой пружины пренебречь.

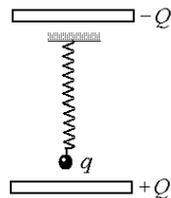


Рис. 5.8

**С2.** Пылинка массы  $m = 1 \cdot 10^{-10}$  г падает между вертикальными пластинами плоского конденсатора на одинаковом расстоянии от них. Из-за сопротивления воздуха скорость пылинки постоянна и равна  $v = 0,1$  см/с. Конденсатор подключают к источнику высокого напряжения  $U = 490$  В, и через время  $t = 10$  с пылнка достигает одной из пластин. Определите за-

ряд 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  $m = 1 \cdot 10^{-11}$  кг со 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  $v = 0,2$  м/с, сравните его с элементарным зарядом,

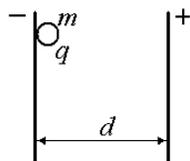


Рис. 5.9

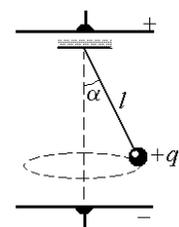


Рис. 5.10

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

**С6.** Внутри плоского конденсатора с напряженностью поля  $E$  равномерно вращается шарик массы  $m$  и с зарядом  $+q$ , подвешенный на нити длины  $l$  (рис. 5.10). Угол отклонения нити от вертикали равен  $\alpha$ . Найти силу натяжения  $T$  нити и кинетическую энергию  $W_k$  шарика.

### *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  $Q$ .

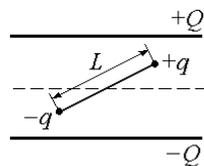


Рис. 5.12

## § 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.

$v_0 = 0$
$d = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$U = 120 \text{ В}$
$l = 3,0 \text{ мм} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
$v = ?$

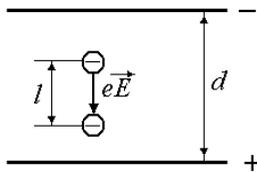


Рис. 6.1

**Решение.** На электрон действует одна сила, равная  $e\vec{E}$ , которая на расстоянии  $l$  совершает над электроном работу  $A = eEl$  (рис. 6.1). Эта работа целиком идет на увеличение кинетической энергии электрона:

$$A = \Delta K \Rightarrow eEl = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} \stackrel{v_0=0}{\Rightarrow} e \frac{U}{d} l = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2eUl}{md}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 120 \text{ В} \cdot 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}} \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $v = \sqrt{\frac{2eUl}{md}} \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$

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

**Задача 6.2.** Электрон влетает в плоский воздушный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью  $v = 6,00 \cdot 10^7$  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.

$$\begin{array}{l} v = 6,00 \cdot 10^7 \text{ м/с} \\ U = 600 \text{ В} \\ d = 1,00 \text{ см} = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ l = 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ \hline h = ? \end{array}$$

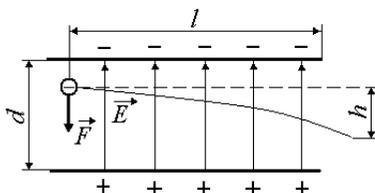


Рис. 6.2

**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

$$l = vt, \quad (1)$$

а по вертикали переместится вниз на расстояние

$$h = at^2/2, \quad (2)$$

где  $a$  – ускорение движения.

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

$$h = al^2/(2v^2). \quad (3)$$

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  $F = ma$ , откуда  $a = F/m$ , где  $F = eE = e \frac{U}{d}$ . Тогда

$$a = \frac{eU}{dm}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), получаем

$$h = \frac{l^2 eU}{2v^2 dm} \stackrel{(\text{СИ})}{=} \frac{(5,00 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600}{2 \cdot (6,00 \cdot 10^7)^2 \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \text{ м} \approx 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$\text{Ответ: } h = \frac{l^2 eU}{2v^2 dm} \approx 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

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

**Задача 6.3.** Пучок электронов, имеющих кинетическую энергию  $T = 10$  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  $y$  на экране.

$T = 10$ кэВ
$U = 40$ В
$d = 1,0$ см
$l = 10$ см
$L = 20$ см
$y = ?$

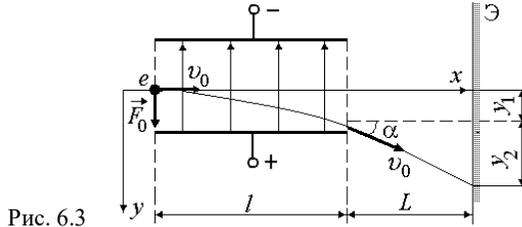


Рис. 6.3

**Решение.** Смещение пучка электронов  $y$  складывается из смещения  $y_1$  внутри конденсатора и смещения  $y_2$  при движении пучка от выхода из конденсатора до экрана (рис. 6.3). В конденсаторе на электрон действует сила  $F_e = eE$ , направленная против силовых линий поля и сообщающая ему ускорение  $a = eE/m$  по оси  $y$ . По оси  $x$  движение равномерное. Тогда

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{at_1^2}{2} = \left[ t_1 = \frac{l}{v_0} \right] = \frac{a}{2} \left( \frac{l}{v_0} \right)^2 = \left[ a = \frac{eE}{m} \right] = \frac{eE}{2m} \left( \frac{l}{v_0} \right)^2 = \left[ E = \frac{U}{d} \right] = \\ &= \frac{eU}{2md} \left( \frac{l}{v_0} \right)^2 = \left( T = \frac{mv^2}{2} \right) = \frac{eUl^2}{4Td}. \end{aligned}$$

Электрон вылетает из конденсатора под углом  $\alpha$  к первоначальному направлению:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{v_y}{v_x} = \frac{at_1}{v_0} = \frac{eEt_1}{mv_0} = \left( t_1 = \frac{l}{v_0} \right) = \frac{eEl}{mv_0^2} = \left( E = \frac{U}{d} \right) = \\ &= \frac{eUl}{mdv_0^2} = (mv_0^2 = 2T) = \frac{eUl}{2Td}. \end{aligned}$$

После вылета из конденсатора по оси  $y$  электрон движется равномерно со скоростью  $v_0 \sin \alpha$  в течение времени  $t_2 = \frac{L}{v_0 \cos \alpha}$ . Тогда

$$\begin{aligned} y_2 &= v_0 \sin \alpha \cdot t_2 = \left( t_2 = \frac{L}{v_0 \cos \alpha} \right) = \frac{v_0 \sin \alpha L}{v_0 \cos \alpha} = \\ &= Lt \operatorname{tg} \alpha = \left( \operatorname{tg} \alpha = \frac{eUl}{2Td} \right) = \frac{eULL}{2Td}. \end{aligned}$$

Таким образом, общее смещение пучка  $y$  равно

$$y = y_1 + y_2 = \frac{eUl^2}{4Td} + \frac{eULL}{2Td} = \frac{eUl}{2Td} \left( \frac{l}{2} + L \right)$$

Вспомним, что  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , тогда  $T = 10 \text{ кэВ} = 10 \cdot 10^3 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$ . Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} y &= \frac{eUl}{2Td} \left( \frac{l}{2} + L \right) = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 40 \text{ В} \cdot 0,10 \text{ м}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \left( \frac{0,10 \text{ м}}{2} + 0,20 \text{ м} \right) \approx \\ &\approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Ответ:  $y = \frac{eUl}{2Td} \left( \frac{l}{2} + L \right) \approx 5 \text{ мм}$ .

СТОП! Решите самостоятельно: В8, С8, Д3.

**Задача 6.4.** Электрон со скоростью  $v = 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$  влетает в пространство между пластинами плоского конденсатора, между которыми поддерживается разность потенциалов  $U = 425 \text{ В}$  (рис. 6.4). Определить максимальное удаление  $h$  электрона от нижней пластины конденсатора. От-

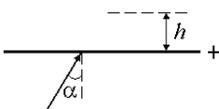


Рис. 6.4

ношение заряда электрона к его массе  $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг, угол падения электронов  $\alpha = 30^\circ$ . Расстояние между пластинами  $d = 1,0$  см.

$$v = 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$U = 425 \text{ В}$$

$$d = 1,0 \text{ см}$$

$$\gamma = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$$h = ?$$

**Решение.** Напряженность поля между пластинами равна  $E = U/d$ . Под действием этого поля электрон в вертикальном направлении испытывает силу  $F = eE$  и получает ускорение

$$a = \frac{F}{m} = \frac{e}{m} E = \gamma E.$$

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.

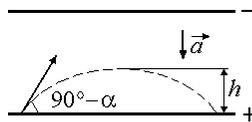


Рис. 6.5

Вспомним, что если тело брошено с начальной скоростью  $v_0$  под углом  $\beta$  к горизонту (рис. 6.6), то максимальная высота подъема равна

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2|a_y|} = \frac{(v_0 \sin \beta)^2}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \beta}{2g}.$$

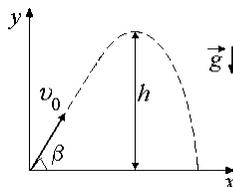


Рис. 6.6

В нашем случае роль  $g$  играет  $a = \gamma E$ , а  $\beta = (90^\circ - \alpha)$ . Тогда

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2(90^\circ - \alpha)}{2\gamma E}.$$

Учитывая, что  $E = U/d$ , а  $\sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$ , получаем

$$h = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha d}{2\gamma U} = \frac{(1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с})^2 \cdot \cos^2 30^\circ \cdot 0,010 \text{ м}}{2 \cdot 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг} \cdot 425 \text{ В}} \approx$$

$$\approx 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,0 \text{ мм}.$$

Ответ:  $h = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha d}{2\gamma U} \approx 5,0 \text{ мм}.$

СТОП! Решите самостоятельно: B9, C9, D4.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задачи легкие

**A1.** 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.

**A2.** Протон и  $\alpha$ -частица, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в плоский конденсатор параллельно пластинам. Во сколько раз отклонение протона полем конденсатора будет больше отклонения  $\alpha$ -частицы?

### Задачи средней трудности

**B1.** 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  $S = 60$  см<sup>2</sup>, расстояние между пластинами  $d = 5$  мм?

**B2.** Поверхностная плотность заряда на пластинах плоского вакуумного конденсатора  $\sigma = 0,30$  мкКл/м<sup>2</sup>. Площадь пластины  $S = 100$  см<sup>2</sup>, емкость конденсатора  $C = 10$  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  $l = 2,0 \times 10^{-2}$  м, достиг скорости  $v = 1,0 \cdot 10^7$  м/с. Заряд на пластинах конденсатора равен  $Q = 5,0 \cdot 10^{-9}$  Кл. Найти площадь пластин конденсатора. Отношение заряда электрона к его массе равно  $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$  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  $E = 500$  В/м? С какой минимальной скоростью  $v_0$  должен влетать электрон, чтобы не упасть на пластину? Масса электрона  $m = 9 \cdot 10^{-28}$  г, заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**B5.** Электрон, летящий со скоростью  $v_0$ , попадает в однородное поле заряженного конденсатора и вылетает из него под углом  $\alpha$  (рис. 6.7).

Найти напряженность поля конденсатора, зная длину  $l$ , массу электрона  $m$  и его заряд  $e$ .

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

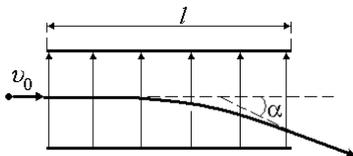


Рис. 6.7

**В7.** В плоский воздушный конденсатор параллельно его пластинам влетает электрон со скоростью  $v_0 = 3,00 \cdot 10^7$  м/с; при вылете из конденсатора он смещается на  $\Delta y = 1,76 \cdot 10^{-3}$  м от своего первоначального направления. Определить отношение заряда электрона к его массе, если длина конденсатора  $l = 3,00$  см, расстояние между пластинами  $d = 2,00 \cdot 10^{-3}$  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  $U_n$ ?

**В9.** В плоский конденсатор длиной  $l = 5,0$  см влетает электрон под углом  $\alpha = 15^\circ$  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  $2,0 \cdot 10^6$  м/с проходит в однородном электрическом поле плоского конденсатора по направлению линий напряженности путь  $3,0 \cdot 10^{-2}$  м. При этом скорость электрона уменьшается. Какова емкость плоского конденсатора, если заряд на его пластинах равен  $4,6 \cdot 10^{-8}$  Кл, а расстояние между ними равно  $5,0 \times 10^{-2}$  м? Отношение заряда электрона к его массе  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

**С2.** Одна из пластин плоского заряженного конденсатора испускает электроны с начальными скоростями  $v$ , которые достигают второй пластины, имея скорость  $4v$ . Заряд на конденсаторе равен  $q$ , площадь пласти-

ны  $S$ . На сколько нужно раздвинуть пластинки конденсатора, чтобы скорость электронов, достигающих второй пластины, изменилась в два раза? Изменением заряда конденсатора вследствие эмиссии пренебречь.

**С3.** Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью  $v = 1,00 \cdot 10^7$  м/с. Напряженность поля в конденсаторе  $E = 100$  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  $v_0 = 1,0 \cdot 10^6$  м/с. Длина конденсатора  $l = 1,0$  см, напряженность электрического поля в нем  $E = 5,0 \cdot 10^3$  Н/Кл. Найти скорость электрона при вылете из конденсатора.

**С5.** Электрон влетает параллельно пластинам в плоский конденсатор, поле в котором  $E = 60$  В/см. Найти изменение модуля скорости электрона к моменту вылета его из конденсатора, если начальная скорость  $v_0 = 2,0 \cdot 10^7$  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  $\alpha = 2,0^\circ$ . Длина пластин  $l = 10$  см, расстояние между ними  $d = 2,0$  см, напряжение между ними  $U = 50$  В. Каким напряжением  $U_0$  были 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

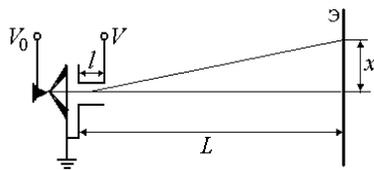


Рис. 6.8

расстояние между конденсатором и экраном  $L$  много больше  $l$ . При разности потенциалов на пластинах конденсатора  $V \ll V_0$  отклонение электрона на экране пропорционально произведению  $L$  и  $V$  и обратно пропорционально  $V_0$ :  $x \approx k(V/V_0)L$ . Определить коэффициент  $k$ .

**С9.** Частица массы  $m$  с зарядом  $q > 0$  влетает в плоский конденсатор, обкладками которого являются металлические сетки (рис. 6.9). Напря-

женность поля в конденсаторе  $E$ , расстояние между сетками  $d$ . Начальная скорость частицы  $v$  составляет угол  $\alpha$  с плоскостью первой сетки. С какой скоростью и под каким углом к плоскости второй сетки вылетит частица из конденсатора?

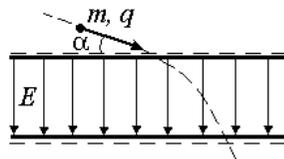


Рис. 6.9

### Задачи очень трудные

**D1.** Одна из пластин плоского конденсатора с расстоянием между пластинами 10 мм освещается рентгеновскими лучами, вырывающими из нее фотоэлектроны со скоростью  $v = 1,0 \cdot 10^6$  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  $n = 1,0 \cdot 10^{13}$  электронов?

**D2.** Пластины плоского конденсатора емкости  $C$ , отстоящие на расстоянии  $l$  друг от друга, несут заряды  $+Q$  и  $-Q$ . Электрон влетел в середину конденсатора со скоростью  $v_0$ , 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  $\text{Cl}^{35}$  и  $\text{Cl}^{37}$ , 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  $v_0 = 1,0 \cdot 10^7$  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  $\text{Cl}^{35}$  и  $\text{Cl}^{37}$  отстояли на приемном экране на  $0,60$  мм друг 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  $\alpha$  к плоскости пластин, а вылетают под углом  $\beta$ . Определить первоначальную кинетическую энергию  $W$  электронов, если напряженность поля внутри конденсатора равна  $E$ .