

Электрическая энергия

1. Покажите, что для энергии взаимодействия N ($N > 1$) точечных зарядов справедлива формула

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i, \quad (1)$$

где φ_i — потенциал поля всех зарядов кроме q_i в точке, где находится заряд q_i .

2. Докажите, что формула (1) даёт энергию системы N проводников, если q_i — заряд i -го проводника, а φ_i — его потенциал.

3. Используя соотношение (1) для энергии системы проводников можно получить формулы для энергии плоского конденсатора:

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (2)$$

вне зависимости от выбора точки с нулевым потенциалом. Однако, применяя соотношение (1) для расчёта энергии конденсатора с зарядами q_1 и q_2 на обкладках ($q_1 \neq -q_2$), и считая потенциал обкладки с зарядом q_1 , равным нулю, мы получим один результат, а считая нулевым потенциал обкладки с зарядом q_2 , — другой. Почему?

4. Получите формулу для плотности энергии поля в вакууме

$$w = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (3)$$

рассмотрев сферический конденсатор с радиусами сфер: R и $R + dR$.

5. Одно распределение зарядов создаёт в точке поле с напряжённостью E_1 , а другое — поле с напряжённостью E_2 . Почему в общем случае формула $w = \frac{\varepsilon_0(E_1^2 + E_2^2)}{2}$ для плотности энергии в точке не верна. Какой должна быть верная формула?

6. Чему равна энергия взаимодействия зарядов равномерно заряженной с поверхностной плотностью σ сферы радиусом R ? Убедитесь в том, что интегрирование плотности энергии поля сферы по всему пространству даёт такой же ответ.

7. Заряд Q равномерно распределён в вакууме по объёму шара радиусом R . Чему равна энергия поля, порождаемого этим распределением заряда?
8. Определите энергию сферического конденсатора ёмкостью C с радиусом внешней сферы, равным R , по обкладкам которого распределены заряды q_1 и q_2 .
9. Заряженное проводящее тело сжали так, что все его линейные размеры уменьшились в n раз. Как изменилась энергия электрического поля этого тела?
10. Металлический шарик радиусом r с зарядом Q concentрически окружён сферической проводящей оболочкой, радиусы внешней и внутренней поверхностей которой равны $3r$ и $2r$, а заряд равен нулю. Найдите электрическую энергию этой системы. Ответ получите двумя способами.
11. В условиях предыдущей задачи оболочка: а) заземлена; б) подключена к источнику, поддерживающему на ней потенциал U . Для каждого случая определите электрическую энергию системы.
12. Заряды $\{q_i\}$ системы проводящих тел являются функциями их потенциалов $\{\varphi_i\}$. Например, для двух проводников справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_{11}\varphi_1 + C_{12}\varphi_2; \\ q_2 &= C_{21}\varphi_1 + C_{22}\varphi_2. \end{aligned} \tag{4}$$

C_{ik} — ёмкостные коэффициенты. Покажите, что из соотношений, подобных (4) для системы N проводников, следует выражение (1) для энергии системы проводников при условии $C_{ik} = C_{ki}$.

13. Покажите, что ёмкостные коэффициенты с одинаковыми индексами (C_{ii}) всегда имеют положительные значения ($C_{ii} > 0$), а коэффициенты с разными индексами ($C_{ik}, i \neq k$) — отрицательные.

14. Докажите для двух проводников теорему взаимности, утверждающую равенство коэффициентов $C_{12} = C_{21}$ в соотношениях (4).

15. Металлический шарик радиусом r окружён concentрической сферической оболочкой, радиус внутренней поверхности которой

равен nr ($n > 2$), толщина оболочки неизвестна. Определите коэффициенты C_{12} и C_{21} в формулах (4) для этой системы проводников.

16. Два одинаковых металлических шарика располагаются на некотором расстоянии друг от друга. Если первый шарик подключить к положительному выводу идеального источника с ЭДС $\mathcal{E}$ (отрицательный вывод заземлён), то на шарике возникнет заряд q_1 . Если же первый шарик подключить к источнику (отрицательный вывод соединён с землёй, как и в первом случае), а второй шарик заземлить, заряд первого станет равен q_2 . Найдите по этим данным коэффициенты C_{12} и C_{21} в формулах (4) для системы двух шариков.

17. На грани правильного тетраэдра, изготовленного из пенопласта (диэлектрическая проницаемость равна 1), наклеены одинаковые тонкие металлические пластины в форме правильных треугольников, почти совпадающие по размерам с гранями тетраэдра. Электрического контакта между пластинами нет. Заряд любой пластины изначально равен нулю. Если одной пластине сообщить заряд Q , то её потенциал будет равен $\frac{Q}{C_0}$. Если теперь заземлить любую незаряженную пластину, то потенциал заряженной окажется равен $\frac{Q}{C_1}$. Найдите разность потенциалов двух пластин, если на одну из них нанесён заряд Q , а заряд второй равен $-Q$, при условии, что другие две пластины не заряжены. Чему равна ёмкость конденсатора, одной обкладкой которого является любая пластина тетраэдра, а другой — три оставшиеся пластины, соединённые друг с другом идеальным проводником?

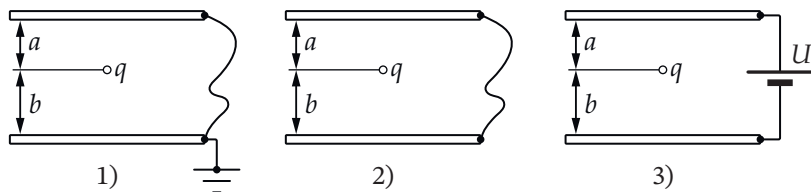
18. Покажите, что утверждение теоремы взаимности (задача 14) может быть переформулировано так (формулировка Грина): пусть совокупности зарядов $\{q_i\}$ системы N проводников соответствует совокупность потенциалов $\{\varphi_i\}$, а совокупности зарядов $\{q'_i\}$ — совокупность потенциалов $\{\varphi'_i\}$. Тогда справедливо равенство

$$\sum_{i=1}^N q_i \varphi'_i = \sum_{i=1}^N q'_i \varphi_i. \quad (5)$$

19. Как изменяются коэффициенты C_{ik} системы проводников при увеличении всех расстояний и линейных размеров в n раз? Как из-

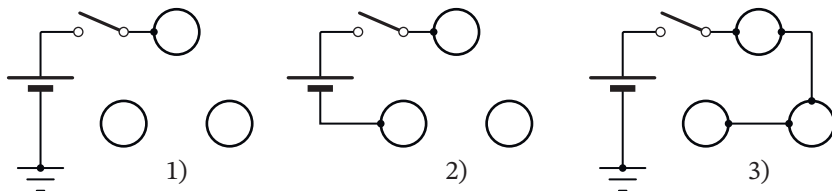
меняется энергия взаимодействия точечного заряда и проводящего тела, при увеличении всех размеров и расстояний в n раз?

20. Точечный заряд q располагается между протяжёнными параллельными металлическими пластинами площадью S , соединёнными проводником, на расстоянии a и b от пластин (см. рисунок). Найдите для каждого случая заряды пластин. Верно ли, что работа внешних сил по перемещению заряда q на бесконечность в каждом из случаев, изображённых на рисунке, будет такой же, как работа по перемещению на бесконечность тонкой протяжённой металлической пластинки с зарядом q , располагающейся изначально на расстоянии a и b от пластин?



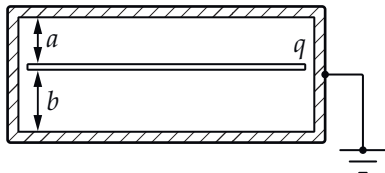
К задаче 20

21. Центры одинаковых проводящих шариков располагаются в вершинах равностороннего треугольника. Изначально заряды шариков равны нулю. Если замкнуть ключ в схеме, изображённой на рисунке 1), то в подводящих проводах и на шариках выделится количество теплоты, равное Q_1 . Если первоначально незаряженные шарики, источник и ключ соединить в цепь, показанную на рисунке 2), то после замыкания ключа выделится количество теплоты, равное Q_2 . Незаряженные шарики соединяют в цепь по схеме, изображённой на рисунке 3). Какое количество теплоты выделится в цепи после замыкания ключа в этом случае?

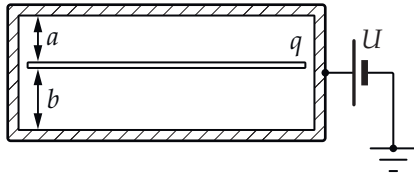


К задаче 21

22. Внутри длинной заземлённой металлической трубы прямоугольного сечения из бесконечности переносится плоская проводящая пластина ёмкостью C_0 , площадью S и зарядом q . Пластина располагается на расстояниях a и b от внутренних поверхностей трубы ($a, b \ll \sqrt{S}$) (см. рисунок). Какая работа совершается при этом? Поле внутри трубы (над и под пластиной) можно считать однородным, краевыми эффектами предлагается пренебречь.



К задаче 22



К задаче 23

23. В условиях предыдущей задачи потенциал трубы поддерживается постоянным, равным U , при помощи идеального источника ЭДС (см. рисунок). Определите заряд трубы после внесения внутрь неё заряженной пластины, если ёмкость трубы равна C . Какую минимальную работу должна совершить внешняя сила, чтобы переместить заряженную пластину из бесконечности внутрь трубы?

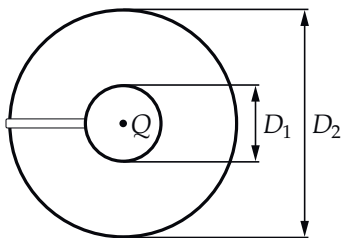
24. Определите давление (обусловленное взаимодействием зарядов) на поверхность равномерно заряженной сферы радиусом R , если заряд сферы равен Q . Как изменится ответ, если окружить сферу бесконечной диэлектрической средой с проницаемостью ϵ ?

25. Определите электростатическое давление на обкладки сферического конденсатора. Радиусы обкладок равны R и r ($r < R$). Заряд конденсатора равен Q . Укажите направление сил давления.

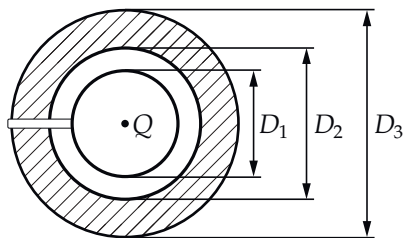
26. Ответьте на вопрос предыдущей задачи при условии, что пространство между обкладками конденсатора заполнено жидким диэлектриком с проницаемостью ϵ , а конденсатор подключен к идеальному источнику с ЭДС $\mathcal{E}$.

27. Найдите силу dF , действующую со стороны заряженного шарика на часть поверхности сферической оболочки из задачи 10, лежащую в пределах телесного угла $d\Omega$. Какая сила действует со стороны шарика на половину сферической оболочки?

28. Маленький шарик с зарядом Q находится в центре закреплённого незаряженного полого шара (см. рисунок) с диаметрами концентрических поверхностей D_1 и D_2 . Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы удалить шарик через узкий канал в проводнике на расстояние от полого шара, значительно большее D_2 ?



К задаче 28



К задаче 29

29. Маленький шарик с зарядом Q находится в центре закреплённого незаряженного полого шара (см. рисунок) с диаметрами концентрических поверхностей D_1 и D_2 . Полый шар окружён снаружи концентрическим слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ и диаметром наружной поверхности D_3 . Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы удалить шарик через узкий канал в слоях проводника и диэлектрика на расстояние от полого шара, значительно большее D_3 ?

30. Точечный заряд q удерживают снаружи заземлённого проводящего шара. В некоторый момент расстояние между центром шара и зарядом очень медленно увеличивается вдвое, так что внешняя сила совершает работу A . Во сколько раз изменяется индуцированный на поверхности сферы заряд? Найдите разность потенциала, создаваемого шаром в точке, где находится заряд после перемещения и потенциала, который создавал шар в точке, где находился заряд до перемещения в тот момент, когда он там находился.

31. Сплошной металлический шар радиусом R распилили пополам, а получившиеся половины сблизил плоскими сторонами так, что ширина зазора d между ними оказалась значительно меньше радиуса шара ($d \ll R$). Найдите силу электростатического взаимодействия полушарий, если их заряды равны q_1 и q_2

32. Частица массой m , имеющая заряд q , приближается с большого расстояния к равномерно заряженному по объёму незакрепленному шару, двигаясь по направлению к центру шара. Радиус шара, его заряд и масса равны соответственно R , q и m . Вначале шар покоится. Какую наименьшую скорость должна иметь частица на большом расстоянии от шара, чтобы пролететь шар насквозь через специальное сквозное отверстие, проходящее через центр шара?

33. Незаряженный металлический шар радиусом R распилили пополам, полушария соединили и поместили в однородное электрическое поле напряжённостью E . С какой силой отталкиваются полушария?

34. Непроводящая сфера радиусом R состоит из двух скреплённых полусфер, которые равномерно покрыты зарядами с поверхностными плотностями σ_1 и σ_2 соответственно. Сферу окружают концентрической проводящей сферической оболочкой, радиус которой близок к радиусу сферы. Оболочку заземляют. Найдите суммарную силу, действующую на сферу со стороны электростатического поля. Краевыми эффектами вблизи линии соединения полусфер можно пренебречь. Изменится ли эта сила, если оболочка будет не заземлённой, а изолированной?

35. На расстоянии b от центра металлического кубика с длиной стороны a и зарядом Q на прямой, перпендикулярной противоположащим граням куба, располагается точечный заряд q массой m . Сначала заряд и кубик удерживают, а затем отпускают. В случае равенства масс кубика и заряда время, за которое расстояние между зарядом и кубиком увеличивается вдвое, оказывается равно t_0 . Найдите время t_1 , за которое расстояние между изначально неподвижными зарядом и кубиком увеличивается в два раза, если масса кубика равна M . За какое время t_2 расстояние между зарядом и кубиком удвоится, если все размеры и расстояния увеличить в 2022 раза, а массу кубика увеличить только в 2 раза по сравнению с исходным случаем (когда рассматриваемое время оказалось равно t_0), оставив заряды кубика и шарика (Q и q) неизменными?

Ответы и комментарии

1. Для доказательства удобно записать формулу в виде:

$$W = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq k}^N \frac{q_i q_k}{r_{ik}},$$

где суммирование производится по всем индексам i и k , кроме $i = k$; r_{ik} означает расстояние между i -м и k -м точечными зарядами. Доказать можно по индукции. Для $N = 2$ легко проверить справедливость формулы, вычислив работу по сближению двух зарядов, изначально располагающихся на очень большом расстоянии друг от друга. Предполагая, что формула верна для произвольного N , вычислим работу внешней силы по переносу заряда q_{N+1} из бесконечности в точку его конечного расположения и убедимся в том, что для $N + 1$ формула тоже верна. Также см. §30 из учебника [7].

2. Каждый проводник можно представить в виде совокупности точечных зарядов и применить формулу из предыдущей задачи, учитывая что потенциалы точек, в которых находятся точечные заряды, принадлежащие одному проводнику, равны друг другу и равны потенциалу проводника. Другой способ вывода формулы демонстрируется в §28 в [7].

3. Соотношение (1) справедливо в предположении о том, что потенциал бесконечно удалённой точки равен нулю. В случае $q_1 = -q_2$ из бесконечности на пластины конденсатора переносится суммарно нулевой заряд, а в противном случае — это не так.

4. $w = \frac{dW}{4\pi R^2 dR} = \frac{qU}{8\pi R^2 dR} = \frac{4\pi\epsilon_0 R^2 E \cdot EdR}{8\pi R^2 dR} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}.$

5. Верная формула учитывает векторный характер напряжённости поля:

$$w = \frac{\epsilon_0 (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2}{2} = \frac{\epsilon_0 (E_1^2 + 2(\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2) + E_2^2)}{2}.$$

6. $W = \frac{2\pi\sigma^2 R^3}{\epsilon_0}.$

7. $W = W_{\text{in}} + W_{\text{out}} = \frac{Q^2}{40\pi\epsilon_0 R} + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{6}{5} \cdot \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}.$

8. $W = \frac{q_1^2}{2C} + \frac{(q_1 + q_2)^2}{8\pi\epsilon_0 R}.$

9. Увеличилась в n раз. Рассмотрите заряженное тело, как совокупность точечных зарядов. Как изменяется энергия взаимодействия системы точечных зарядов при изменении всех расстояний в n раз?

10. Можно использовать формулу для энергии системы проводников (1-й способ), а также проинтегрировать плотность энергии по всему пространству (2-й способ). В любом случае получится ответ: $W = \frac{5}{6} \cdot \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}$.

11. а) $W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}$; б) $W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R} + 6\pi\epsilon_0 R U^2$.

12. При переносе малых порций заряда dq_1 и dq_2 из бесконечности энергия системы проводников изменяется на величину, равную

$$dW = C_{11}U_1dU_1 + C_{12}U_2dU_1 + C_{21}U_1dU_2 + C_{22}U_2dU_2,$$

где U_1 и U_2 — текущие значения потенциалов проводников. При условии $C_{12} = C_{21}$ это выражение интегрируется, поскольку справедливо равенство $U_1dU_2 + U_2dU_1 = d(U_1U_2)$. В итоге получается соотношение

$$W = \frac{C_{11}\varphi_1^2}{2} + C_{12}\varphi_2\varphi_1 + \frac{C_{22}\varphi_2^2}{2},$$

которое может быть записано в виде

$$W = \frac{1}{2} (q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 — конечные значения потенциалов проводников.

13. Сначала можно рассмотреть два проводника. Заземлим любой из них. Что можно сказать о знаках зарядов проводников?

14. Доказательство следует из того факта, что энергия системы проводников определяется только зарядами проводников и не зависит от способа зарядки. Вариант доказательства (однако, не самый удачный) приводится в §28 в учебнике [7].

15. $C_{12} = C_{21} = -4\pi\epsilon_0 r \cdot \frac{n}{n-1}$.

16. $C_{12} = C_{21} = -\frac{\sqrt{q_2^2 - q_2 q_1}}{g}$.

17. $\Delta\varphi = \frac{2Q}{C_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{C_0}{C_1}}\right)$; $C = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_0}{1 - \sqrt{1 - \frac{C_0}{C_1}}}$.

18. Утверждение может быть доказано на основе теоремы взаимности из задачи 14. Также см. Problem 33, p. 123-124 из [2].

19. Коэффициенты увеличиваются в n раз.

20. Рекомендуется использовать теорему взаимности в формулировке Грина (задача 18). 1) $q_a = -\frac{qb}{a+b}$, $q_b = -\frac{qa}{a+b}$; 2) $q_a = q \frac{a-b}{2(a+b)}$, $q_b = q \frac{b-a}{2(a+b)}$; 3) $q_a = q \frac{a-b}{2(a+b)} + \frac{S\epsilon_0}{a+b} U$, $q_b = q \frac{b-a}{2(a+b)} - \frac{S\epsilon_0}{a+b} U$. При замене точечного заряда

на металлическую пластинку заряды верхней и нижней пластин не изменятся в каждом из рассматриваемых случаев. Следовательно, не изменится также и энергия системы проводников. Поэтому работа внешних сил по перемещению пластинки на бесконечность будет такой же, как работа по перемещению на бесконечность точечного заряда. у

$$21. Q_3 = \frac{3Q_1Q_2}{3Q_2 - Q_1}.$$

$$22. A = W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}} = \frac{q^2}{2C_0} \left(\frac{C_0}{S\varepsilon_0} \cdot \frac{ab}{a+b} - 1 \right).$$

23. После внесения пластины на внутренней поверхности трубы возникнет заряд, экранирующий поле пластины в пространстве снаружи внутренней поверхности, поэтому заряд внутренней поверхности будет равен $-q$. Заряд внешней поверхности трубы будет таким же (CU), как до внесения пластины. Таким образом, заряд трубы после внесения пластины будет равен $CU - q$. Поле снаружи трубы будет создаваться только зарядами на внешней поверхности трубы, его энергия будет такой же, как до внесения пластины. На верхней и нижней плоскостях внутренней поверхности трубы возникнут такие же заряды, как в конфигурации задачи 20, п. 1). Искомая работа равна изменению электрической энергии системы за вычетом работы источника ЭДС:

$$A = W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}} - A_U = \frac{q^2}{2C_0} \left(\frac{C_0}{S\varepsilon_0} \cdot \frac{ab}{a+b} - 1 \right) + qU.$$

$$24. p = \frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 R^4}; p = \frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 R^4}.$$

25. $p_{\text{in}} = \frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 r^4}$, $p_{\text{out}} = \frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 R^4}$. Силы давления, действующие на внутреннюю сферу, направлены наружу, а действующие на внешнюю, — направлены внутрь.

26. Давление на обкладки можно найти, воспользовавшись методом виртуальных перемещений. Давление на внешнюю обкладку определяется из соотношения $p_R \cdot 4\pi R^2 = \frac{dW}{dR} - \frac{\delta A_{\mathcal{E}}}{dR}$, где $W = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$ — энергия конденсатора, $\delta A_{\mathcal{E}}$ — работа батареи по перемещению заряда $dq = \mathcal{E}dC$. После подстановки выражения для ёмкости и преобразований получается ответ

$$p_R = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\mathcal{E}^2}{2R^2} \cdot \frac{r^2}{R^2 - r^2}.$$

Знак « $-$ » указывает на то, что силы давления, действующие на внешнюю обкладку конденсатора, направлены к общему центру сферических поверх-

ностей, иначе говоря, стремятся «сжать» конденсатор. Аналогично находится давление на внутреннюю обкладку (в данном случае, как и следовало ожидать, силы давления направлены от центра):

$$p_r = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \mathcal{E}^2}{2r^2} \cdot \frac{R^2}{R^2 - r^2}.$$

27. Имеет смысл использовать формулу $p = w_2 - w_1$, где w — объёмная плотность энергии. Тогда для силы, приходящейся на элемент телесного угла имеем соотношение

$$\frac{dF}{d\Omega} = -\frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 r^2} \left(1 - \frac{1}{9}\right) = -\frac{8}{9} \cdot \frac{Q^2}{32\pi^2\varepsilon_0 r^2}.$$

Сила, действующая на половину сферической оболочки, равна

$$F_{(1/2)} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dF}{d\Omega r^2} \cdot 2\pi r^2 \sin \varphi \cos \varphi \cdot d\varphi = \pi \frac{dF}{d\Omega} = -\frac{Q^2}{36\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Как и в предыдущей задаче, знак «−» указывает на то, что сила направлена к общему центру сферических поверхностей.

28. $A = W_C = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2}\right).$

29. $A = W^{(13)} - W_\varepsilon^{(23)} = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left(\left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_3}\right) - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_3}\right)\right).$

30. Заряд, индуцированный на поверхности сферы, уменьшится в два раза (это следует из метода изображений). Энергия системы до перемещения заряда равна $W_1 = \frac{q\varphi_1}{2}$, после перемещения эта энергия станет равна $W_2 = \frac{q\varphi_2}{2}$, искомая разность потенциалов равна

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2 \frac{W_2 - W_1}{q} = \frac{2A}{q}.$$

31. $F = \frac{(3q_1 - q_2)(3q_2 - q_1)}{32\pi\varepsilon_0 R^2}.$

32. $v = \sqrt{\frac{3q^2}{2\pi\varepsilon_0 Rm}}.$

33. $F_{(1/2)} = \frac{9}{4} \cdot \pi\varepsilon_0 E^2 R^2$. Поле индуцированных зарядов снаружи шара будет эквивалентно полю точечного диполя с моментом $p = 4\pi\varepsilon_0 R^3 E$. Вблизи поверхности шара суммарное поле направлено вдоль радиуса (по нормали к поверхности шара) и определяется формулой $E_1(\theta) = 3E \cos \theta$, где θ — угол между направлением внешнего однородного поля и радиусом, проведённым в рассматриваемую точку. Далее вычисляется объём-

ная плотность энергии вблизи поверхности шара и электростатическое давление $p(\theta)$. Интегрирование давления по площади даёт силу.

34. $F = \frac{\pi R^2}{2\epsilon_0} |\sigma_1^2 - \sigma_2^2|$, сила не изменится.

35. $t_1 = t_0 \sqrt{\frac{m+M}{2M}}$; $t_2 = t_0 \sqrt{\frac{2022.4}{3}}$. Время, за которое расстояние между кубиком и шариком увеличивается на dx , равно

$$dt = \sqrt{\frac{\mu}{2(W(b) - W(x))}} \cdot dx,$$

где μ — приведённая масса, $W(x)$ — энергия взаимодействия кубика и заряда, при расстоянии x между зарядом и центром кубика.

Комментарии к списку литературы

При составлении задания использовались книга [4], архив задач Всероссийской олимпиады [1], ресурс [6]. Теорию можно освоить по учебнику [7] (§§ 27-30, 33, система СГС) или учебнику [5] (§2.6, стр. 185, система СИ, очень коротко). Весьма полезной может оказаться книга [3] (система СИ), в которой на примерах задач подробно и понятно разбираются многие сложные вопросы теории. Если вы в состоянии читать литературу на английском языке, то рекомендуем также ознакомиться с книгой [2] профессора MIT Маркуса Зана, в которой разбирается большое количество нетривиальных задач, а сложные для понимания рассуждения поясняются понятными рисунками (система СИ).

Список литературы

1. *4ipho.ru*. Сайт подготовки нац. команд РФ к Межд. ол. по физике IPhO и Межд. естественно-научной ол. юн. IJSO [Электронный ресурс]. — 2015. — URL: <http://www.4ipho.ru/arhiv-y-zadach/> (дата обр. 15.04.2022).
2. Zahn M. Electromagnetic field theory: a problem solving approach. — Malabar, FL : Krieger Publishing Company, 2003. — 727 с. — URL: <https://docs.google.com/file/d/0B21HoBq6u9TsVvk5HVVo0S1YyMUK/view>.
3. Брандт Н. Н., Миронова Г. А., Салецкий А. М. Электростатика в вопросах и задачах. Пособие по решению задач для студентов: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — СПб. : Издательство «Лань», 2010. — 288 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

4. Задачи Московских городских олимпиад по физике. 1986—2005 / С. Д. Варламов [и др.] ; под ред. М. В. Семёнова, А. А. Якуты. — 2-е изд., исправл. — М. : МЦНМО, 2006. — 623 с. — URL: <http://genphys.phys.msu.ru/ol/olimpbook.pdf>.
5. Кингсеп А. С., Локишин Г. Р., Ольхов О. А. Основы физики. Курс общей физики: Учебн. В 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / под ред. А. С. Кингсепа. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 506 с.
6. ЛФИ МФТИ. Кубок ЛФИ [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://lpr-olimp.ru/> (дата обр. 05.05.2022).
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебн. пособие. Для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество. — 6-е изд., стереот. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2020. — 656 с.