

Тема 3. Электродинамика

3.1. Электрическое поле

1. Электрический заряд

Такие понятия, как электрический заряд, напряженность электрического поля, потенциал, были введены, чтобы объяснить наблюдаемые в природе электрические явления.

Известно, что все тела, в том числе и элементарные частицы, притягиваются друг к другу с силой тяготения. Но эксперименты показывают, что электрон и протон притягиваются друг к другу с силой, превышающей силу тяготения в 10^{39} раз. То есть, сила взаимодействия между электроном и протоном имеет совсем другую природу.

Это взаимодействие частиц назвали **электромагнитным взаимодействием**. А **электрическим зарядом** стали называть свойство элементарной частицы участвовать в электромагнитном взаимодействии. Если частица имеет электрический заряд (заряжена), то она участвует в электромагнитном взаимодействии. А если электрический заряд у частицы отсутствует, то она в электромагнитном взаимодействии не участвует.

Понятие электрического заряда раскрывается через его свойства:

1) Существует два типа электрических зарядов - положительный и отрицательный. Частицы с одноименными зарядами отталкиваются, а с разноименными – притягиваются друг к другу.

2) Электрический заряд - это скалярная величина, обозначаемая q или Q . Единицей заряда в системе СИ является **кулон**, это производная единица. Его определяют через основную единицу системы СИ - ампер. Кулон – это заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока один ампер $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$.

3) **Элементарный заряд** - это заряд элементарных частиц. В системе СИ он равен

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Носитель положительного заряда – это протон, носитель отрицательного заряда – электрон. Заряд протона равен $q_p = +e$, заряд электрона: $q_e = -e$. Отделить заряд от частиц невозможно и разделить элементарный заряд на части также невозможно.

4) Заряд системы равен сумме зарядов ее составных частей. Например, заряд атома водорода, состоящего из протона и вращающегося вокруг него электрона, равен нулю. Точно также, незаряженными являются и другие атомы, а также и тела, состоящие из незаряженных атомов.

Если у тела число протонов не равно числу электронов, то тело заряжено. При избытке электронов тело имеет отрицательный заряд, при избытке протонов – положительный.

5) **Закон сохранения заряда**. При любых процессах суммарный заряд замкнутой системы сохраняется. Если система не замкнута, то ее заряд изменяется строго на ту величину, которую вносят в систему или выносят другие тела.

Закон сохранения заряда выполняется абсолютно точно, как в малых, так и в больших масштабах. В настоящее время не обнаружено ни одного отступления от этого закона (в том числе, при химических процессах, ядерных реакциях и превращениях элементарных частиц).

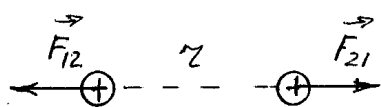
6) **Электризация** – это сообщение телу заряда. Так как заряд не может появиться или исчезнуть, то любая электризация – это перераспределение зарядов между телами.

Пример: При натирании стеклянной палочки шелком она приобретает положительный заряд, а шелк – отрицательный заряд. Объясняется это так: при соприкосновении разных материалов электроны переходят из материала с меньшей энергией связи в материал с большей энергией связи (трение просто обеспечивает большую площадь контакта). Палочка отдает электроны и заряжается положительно, а шелк их присоединяет и заряжается отрицательно. В результате, тела приобретают заряды противоположных знаков. Суммарный заряд тел при электризации остается равным нулю.

2. Закон Кулона

Два неподвижных точечных заряда в вакууме взаимодействуют друг с другом с силами, прямо пропорциональными произведению модулей зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$



Направления сил определяется знаками зарядов. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

В соответствии с третьим законом Ньютона эти силы приложены к разным телам. Они направлены вдоль линии, соединяющей эти заряды, равны по величине и противоположны по направлению.

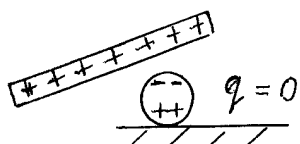
В системе СИ силу измеряют в Ньютонах, расстояние в метрах, а заряд - в Кулонах. Коэффициент пропорциональности равен $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$. Обычно его записывают в рационализированном виде

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

где: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ - электрическая постоянная.

У любого закона есть область применения. В частности, закон Кулона справедлив:

- только для 2-х тел. Если число тел больше двух, то сила, действующая на любое тело, равна векторной сумме сил взаимодействия этого тела с другими телами;
- только для неподвижных тел. Для движущихся тел к электростатическому взаимодействию нужно добавить еще магнитное взаимодействие;
- только в вакууме. В веществе сила взаимодействия зарядов будет меньше. Уменьшение силы взаимодействия учитывают через диэлектрическую проницаемость среды;
- только для точечных зарядов. Заряды называют точечными, если их размеры малы по сравнению с расстоянием между ними.



Пример: Заряженная расческа притягивает незаряженные бумажки. По закону Кулона сила взаимодействия должна быть равна нулю. Но здесь тела не точечные и пользоваться законом Кулона нельзя.

Притяжение можно объяснить, если оба тела разбить на малые участки и рассмотреть взаимодействие между ними как между точечными зарядами. Тогда различные участки бумажки оказываются заряженными, хотя суммарный заряд бумажки равен нулю. Заряды противоположного знака будут к расческе ближе, поэтому они притягиваются к ней большей силой, чем отталкиваются одноименные заряды. То есть, на малых расстояниях незаряженные тела всегда притягиваются к заряженным.

3. Напряженность электрического поля

Закон Кулона описывает взаимодействие 2-х зарядов на расстоянии. Это пример теории **дальнодействия** (действия на расстоянии). В рамках этой теории трудно понять, что же действует на данный заряд, если вокруг его пустота, то есть, вообще ничего нет.

Теория дальнодействия противоречит жизненному опыту людей, где взаимодействие всегда происходит или при непосредственном контакте, или через посредника.

Для объяснения механизма взаимодействия зарядов Фарадей ввел понятие **электрического поля**, которое играет роль посредника. Электрический заряд создает вокруг себя электрическое поле (что-то вроде облачка). Если в этом поле находится другой заряд, то на него действует сила со стороны электрического поля. То есть, Фарадей заменил теорию дальнего действия на теорию **близкого действия** (взаимодействие через посредника).

Сейчас существование электрического поля хорошо доказано. Электрическое поле обладает энергией, оно распространяется не мгновенно, а со скоростью света. Природу электрического поля объясняет квантовая механика, но это объяснение выходит за пределы школьной программы. В школе электрическое поле называют особым видом материи, которая окружает заряженную частицу.

Итак, **электрическое поле создается электрическими зарядами и действует на электрические заряды**. То есть, электрическое поле можно обнаружить пробным электрическим зарядом. Если на пробный заряд действует сила, то в данной точке есть электрическое поле.

Опыты показывают, что эта сила пропорциональна величине пробного заряда. Тогда отношение силы, действующей на пробный заряд, к величине этого заряда не будет зависеть от величины пробного заряда. Это характеристика электрического поля без пробного заряда. Она называется **напряженностью электрического поля**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напряженность электрического поля – это векторная величина. Ее направление совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

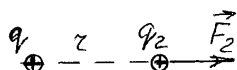
Зная напряженность электрического поля, можно определить силу, действующую на заряд в электрическом поле

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Эту формулу можно применять для заряженных тел любых размеров, в отличие от закона Кулона, который справедлив только для точечных зарядов.

4. Напряженность поля точечного заряда

Если вблизи точечного заряда q поместить пробный заряд q_2 , то по закону Кулона на него будет действовать сила

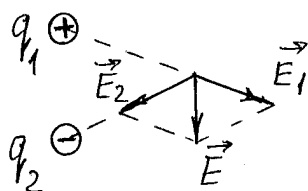


$$F_2 = k \cdot \frac{q \cdot q_2}{r^2}$$

поделив которую на величину пробного заряда, получим величину напряженности электрического поля точечного заряда

$$E = k \cdot \frac{q}{r^2}$$

Если ось координат направить вдоль прямой линии с началом на заряде, то знак напряженности совпадёт со знаком заряда и модуль можно не ставить.

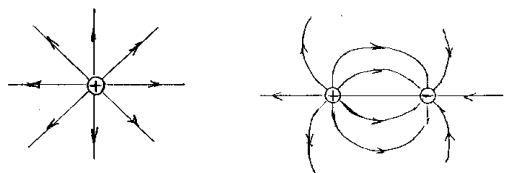


Из правила сложения сил следует **принцип суперпозиции**: напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей, создаваемых отдельными зарядами

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

Напряженность электрического поля, создаваемого заряженным телом произвольной формы, можно определить, если мысленно разбить тело на точечные заряды, и воспользоваться принципом суперпозиции.

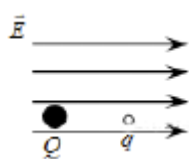
5. Силовые линии



Это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности поля. Силовые линии позволяют оценить направление напряженности поля - по направлению касательной, а величину напряженности по густоте силовых линий.

Силовые линии в электростатике не замкнуты. Они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах. Роль одного из зарядов может играть бесконечность.

Следует отметить, что в школе изучают только электрическое поле, создаваемое покоящимися зарядами. Его называют также **электростатическим** или **кулоновским** полем. В природе существует еще **вихревое электрическое поле**, силовые линии которого замкнуты. Такое поле создается изменяющимся магнитным полем. Вихревое электрическое поле в школе не изучают.



Пример. Два шарика с зарядами $Q = -1$ нКл и $q = 5$ нКл соответственно, находятся в однородном электрическом поле с напряженностью $E = 18$ В/м, на расстоянии $r = 1$ м друг от друга. Масса большего шарика равна $M = 5$ г. Определите, какую массу должен иметь маленький шарик, чтобы они двигались с прежним между ними расстоянием и с постоянным по модулю ускорением.

Решение. Направим ось X вдоль напряженности электрического поля и запишем уравнения движения частиц

$$-|Q| \cdot E + k \cdot \frac{|Q| \cdot q}{r^2} = Ma$$

$$q \cdot E - k \cdot \frac{|Q| \cdot q}{r^2} = ma$$

Решая данную систему уравнений, получим

$$m = M \cdot \frac{q}{|Q|} \cdot \frac{Er^2 - k \cdot |Q|}{kq - Er^2} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

6. Потенциал электрического поля

При изучении механики мы говорили, что все силы можно разделить на 2 группы: потенциальные (консервативные) и непотенциальные (диссипативные). Силу называют потенциальной, если ее работа не зависит от формы пути, а только от положения начальной и конечной точек. Для таких сил можно ввести понятие потенциальной энергии. А если все силы потенциальные, то механическая энергия тела сохраняется. Примером потенциальной силы является сила тяжести $F=mg$, у которой потенциальная энергия равна $W_p = mgh$.

В **электростатике** работа электрического поля по перемещению заряда не зависит от формы пути. То есть, сила, действующая на заряд в электрическом поле, является **потенциальной силой**, а заряженные частицы в электрическом поле обладают **потенциальной энергией**. Следовательно, для электрического поля можно ввести понятие потенциальной энергии так, что работа электростатического поля равна уменьшению потенциальной энергии

$$A = W_{p1} - W_{p2}.$$

В электрическом поле на заряженную частицу действуют только потенциальные силы, поэтому ее **механическая энергия сохраняется**

$$W_k + W_p = \text{const}$$

Тогда потенциальную энергию частицы в электрическом поле можно определить по величине кинетической энергии, которую она приобретет при вылете из поля $W_p = W_k$

Опыты показывают, что потенциальная энергия пробного заряда в электрическом поле пропорциональна величине этого заряда. А если поделить потенциальную энергию на заряд, то полученная величина не будет зависеть от величины пробного заряда, - это характеристика поля без данного заряда. Ее называют **потенциал электрического поля**

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Потенциал – скалярная величина, она не имеет направления, но имеет знак – положительный или отрицательный. Зная потенциал электрического поля, можно найти потенциальную энергию заряда в электрическом поле

$$W_p = q \cdot \varphi$$

Из определения потенциальной энергии следует формула работы электрического поля по перемещению заряда

$$A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad \text{или} \quad A = q \cdot U$$

Величина $U = \varphi_1 - \varphi_2$ называется **разностью потенциалов** или **напряжением**. Потенциал и напряжение в системе СИ измеряется в вольтах $[\varphi] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$ (вольт).

Потенциал и потенциальная энергия зависят от выбора точки нулевого потенциала. Обычно в задачах с точечными зарядами считается, что ноль потенциала находится в бесконечно удаленной точке. В электротехнике за ноль потенциала обычно принимают Землю. Что касается разности потенциалов и работы электрического поля, то они не зависят от выбора точки нулевого потенциала.

7. Потенциал поля точечного заряда

Потенциал электрического поля, создаваемого точечным зарядом в вакууме, можно рассчитать по формуле

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r}$$

Для системы зарядов справедлив **принцип суперпозиции**: потенциал системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых отдельными зарядами

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$$

Потенциал поля, создаваемого заряженным телом любой формы, можно определить, если мысленно разбить тело на точечные заряды, и воспользоваться принципом суперпозиции.

8. Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов

Потенциальную энергию взаимодействия 2-х точечных зарядов можно найти, полагая, что второй заряд находится в поле, создаваемым первым зарядом

$$W_p = q_2 \cdot \varphi_1 \quad W_p = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

При одноименных зарядах $W_p > 0$ – это несвязанная система. Она самопроизвольно разлетается, и ее положительная потенциальная энергия переходит в кинетическую.

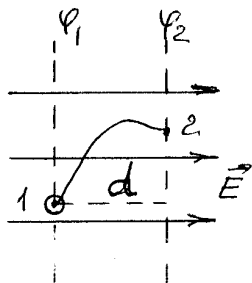
При разноименных зарядах $W_p < 0$ – это связанная система, она самопроизвольно разлететься не может. Чтобы разорвать связанную систему на составные части, нужно увеличить ее энергию до нуля. То есть, совершить работу, равную модулю потенциальной энергии.

Если зарядов несколько, то из принципа суперпозиции следует, что потенциальная энергия системы складывается из потенциальных энергий парных взаимодействий.

9. Эквипотенциальные поверхности

Эквипотенциальные поверхности - это поверхности равного потенциала. Так как работа электрического поля по перемещению заряда по ним равна нулю, то эти поверхности во всех точках перпендикулярны силовым линиям.

Эквипотенциальные поверхности у однородного поля – это плоскости, перпендикулярные силовым линиям.



В однородном поле при перемещении заряда между эквипотенциальными поверхностями работа электрического поля равна

$$\text{- через потенциал поля} \quad A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot U;$$

$$\text{- через напряженность поля} \quad A = q \cdot E \cdot d.$$

Отсюда следует **связь между напряженностью поля и разностью потенциалов** в однородном поле

$$U = E \cdot d,$$

где: d - это расстояние между эквипотенциальными поверхностями.

Следует отметить, что такая связь между разностью потенциалов и напряженностью поля справедлива только **для однородного поля**. При неоднородном поле эту зависимость можно применять только для малых участков, на которых поле изменяется незначительно.

Пример 1. В точке с потенциалом $\varphi_1 = 10$ В электрон имеет скорость $V_1 = 10$ м/с. Определить его скорость в точке с потенциалом $\varphi_2 = 100$ В.

Решение. В электрическом поле механическая энергия электрона сохраняется

$$-e\varphi_1 + \frac{mV_1^2}{2} = -e\varphi_2 + \frac{mV_2^2}{2}$$

Отсюда находим

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - \frac{2e}{m} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} = 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Пример 2. Два электрона находятся на бесконечно большом расстоянии друг от друга. При этом один электрон неподвижен, а второй движется на него со скоростью V . На какое наименьшее расстояние сблизятся электроны?

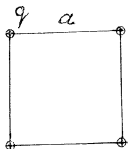
Решение. При наименьшем расстоянии скорость сближения электронов равна нулю, то есть, они движутся с одинаковыми скоростями. В процессе движения сохраняются импульс и механическая энергия системы электронов.

$$mV = 2mV_2$$

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{2mV_2^2}{2} + k \cdot \frac{e^2}{R}$$

Отсюда находим

$$R = \frac{4ke^2}{mV^2}$$



Пример 3. Определите работу A , которую надо совершить, чтобы четыре одинаковых электрических заряда $q = 10^{-8}$ Кл расположить в вершинах квадрата со стороной $a = 10$ см.

Решение. Считаем, что заряды вначале покоились и находились далеко друг от друга. Их потенциальная и кинетическая энергия были равны нулю.

В конце заряды покоятся и находятся в вершинах квадрата. Кинетическая энергия зарядов равна нулю, а потенциальная складывается из энергии взаимодействия 4-х пар по сторонам квадрата и 2-х пар по его диагоналям.

Так как изменение механической энергии системы равно работе непотенциальных сил, то получаем:

$$A = E_{p2} = 4k \cdot \frac{q^2}{a} + 2k \cdot \frac{q^2}{a \cdot \sqrt{2}} = k \cdot \frac{q^2}{a} \cdot (4 + \sqrt{2}) = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$$

Основные понятия

Электрический заряд – это свойство элементарных частиц, мера их участия в электромагнитном взаимодействии. Существует два типа электрических зарядов - положительный и отрицательный. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

Элементарный электрический заряд - это заряд элементарных частиц $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Заряд протона $q_p = +e$, заряд электрона: $q_e = -e$. Элементарный заряд разделить на части невозможно, поэтому заряд любого тела кратен элементарному $q = \pm N \cdot e$, где: N - целое число.

Заряд системы равен сумме зарядов, входящих в нее частиц. Заряд замкнутой системы сохраняется при любых процессах в этой системе.

Электризация – это сообщение телу заряда. Любая электризация – это перераспределение заряженных частиц между телами.

Закон Кулона: два неподвижных точечных заряда в вакууме взаимодействуют друг с другом с силами

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Постоянная закона Кулона и электрическая постоянная: $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2$

Электрическое поле создается электрическими зарядами и действует на другие электрические заряды.

Напряженность электрического поля это отношение силы, действующей на пробный электрический заряд к величине этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

$$E = k \cdot \frac{q}{r^2}$$

- напряженность поля точечного заряда

- принцип суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

Электрические силы – потенциальные, так как их работа не зависит от формы пути. Для них можно использовать понятия потенциальной энергии и потенциала электрического поля.

Работа электрического поля равна уменьшению потенциальной энергии $A = W_{p1} - W_{p2}$;

Механическая энергия заряженных частиц в электрическом поле сохраняется $W_k + W_p = \text{const}$;

Потенциал электрического поля – это отношение потенциальной энергии заряженной

частицы в электрическом поле к величине этого заряда

$$\varphi = \frac{W_p}{q} \quad W_p = q \cdot \varphi$$

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r}$$

- потенциал поля точечного заряда

- принцип суперпозиции

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$$

$$W_p = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

- потенциальная энергия взаимодействия 2-х точечных зарядов

- работа электрического поля при перемещении заряда

$$A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2); \quad A = q \cdot U;$$

- разность потенциалов в однородном поле

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = E \cdot d; \quad U = E \cdot d;$$

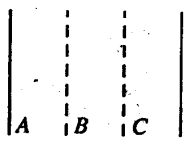
Задачи 3.1. Электрическое поле

9.13. Два одинаковых металлических шарика подвешены на одинаковых очень длинных нитях в одной точке. Шарика зарядили одинаковым зарядом, и они разошлись на расстояние $a = 5$ см. Один из шариков разрядили. Каким стало расстояние между ними?

1.5. Три отрицательных заряда величиной $9 \cdot 10^{-9}$ Кл каждый расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд надо поместить в центре треугольника, чтобы система находилась в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?

10.10. Тонкое кольцо радиусом R заряжено зарядом q . Найти напряженность электрического поля на оси кольца как функцию от расстояния до центра кольца x . Рассмотреть случай $x \gg R$. При каком значении x напряженность максимальна?

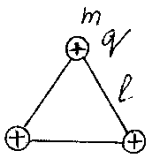
2.5. В вершинах квадрата, сторона которого a , находятся заряды: $q, -q, -2q, 2q$. Определите напряженность и потенциал в центре квадрата.



4.6. Пластины А и Д заземлены, сетки В и С имеют по отношению к Земле потенциалы 200 В и 100 В, соответственно. Из пластины А без начальной скорости вылетает электрон. С какими скоростями он пересекает сетки В и С и достигает пластины Д? Отношение заряда электрона к его массе $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

4.10. Пучок электронов, пройдя ускоряющую разность потенциалов 10 кВ, влетает в середину между пластинами плоского конденсатора параллельно им. Какое напряжение необходимо подать на пластины конденсатора, чтобы пучок электронов при выходе из конденсатора отклонялся от своего начального направления на максимальный угол? Длина пластин 10 см, расстояние между ними 3 см.

3.1. В точке с потенциалом $\varphi_1 = 10$ В электрон имеет скорость $V_1 = 10$ м/с. Определить его скорость в точке с потенциалом $\varphi_2 = 100$ В.



3.2. На гладком столе лежат три маленьких шарика с одинаковыми массами m и зарядами q , связанными нитями равной длины l . Одну нить пережигают. Определить скорость шариков в момент, когда они расположатся на одной прямой.

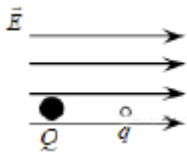
7.15. Два небольших тела, связанные нитью длиной L , лежат на одной горизонтальной плоскости. Заряд каждого тела равен q , масса m . Нить пережигают, и тела начинают скользить по плоскости. Какую максимальную скорость разовьют тела, если коэффициент трения между плоскостью и телами равен μ ?

10.19. Два электрона находятся на бесконечно большом расстоянии друг от друга. При этом один электрон неподвижен, а второй движется на него со скоростью V . На какое наименьшее расстояние сблизятся электроны?

10.9. Найти радиус атома водорода, если известно, что минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он покинул атом, равна 13,6 эВ. Считать, что электрон в атоме движется вокруг тяжелого неподвижного ядра по круговой орбите.

08.6.3. Четыре одинаковых маленьких шарика с массой m и зарядом q каждый удерживают в вершинах квадрата со стороной a . Один шарик отпускают, продолжая удерживать остальные неподвижно. Какую скорость наберет освобожденный шарик, удалившись на большое расстояние?

Задачи 3.1. Электрическое поле

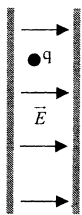


C9. Два шарика с зарядами $Q = -1$ нКл и $q = 5$ нКл соответственно, находятся в однородном электрическом поле с напряженностью $E = 18$ В/м, на расстоянии $r = 1$ м друг от друга. Масса большего шарика равна $M = 5$ г. Определите, какую массу должен иметь маленький шарик, чтобы они двигались с прежним между ними расстоянием и с постоянным по модулю ускорением.

C10. Определите работу A , которую надо совершить, чтобы четыре одинаковых электрических заряда $q = 10^{-8}$ Кл расположить в вершинах квадрата со стороной $a = 10$ см.

B3. Пластины большого по размерам плоского конденсатора расположены горизонтально на расстоянии $d = 1$ см друг от друга. В пространстве между пластинами падает капля жидкости. Масса капли $4 \cdot 10^{-6}$ кг, ее заряд $q = 8 \cdot 10^{-11}$ Кл. При каком напряжении на пластинах скорость капли будет постоянной? Влиянием воздуха на движение капли пренебречь.

C1. Какую скорость будет иметь ядро лития ${}^6_3\text{Li}$ при ускорении в электрическом поле с разностью потенциалов 4 В? Начальную скорость частицы считать равной 0 м/с.



C2. Между двумя параллельными, вертикально расположенными диэлектрическими пластинами создано однородное электрическое поле, напряженность которого равна $E = 2 \cdot 10^5$ В/м. Между пластинами помещен шарик на расстоянии $d = 1,5$ см от левой пластины и $b = 2,5$ см от правой. Заряд шарика $q = -0,2$ нКл, масса $m = 20$ мг. Шарик освобождают, и он начинает двигаться. На сколько успеет сместиться шарик по вертикали до удара об одну из пластин? Пластины имеют достаточно большой размер.

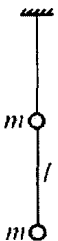
C3. Электрон влетел в плоский конденсатор, находясь на одинаковом расстоянии от каждой пластины и имея скорость 10^4 км/с, направленную параллельно пластинам. Расстояние между пластинами 1 см, длина каждой пластины 2,5 см. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к пластинам, чтобы электрон не вылетел из конденсатора?

C4. Шарик, находящийся в масле плотностью 800 кг/м³, «висит» в поле плоского конденсатора. Плотность вещества шарика 2700 кг/м³, его радиус 2 мкм, расстояние между обкладками конденсатора 1 см. Каков заряд шарика, если электрическое поле направлено вертикально вниз, а разность потенциалов между обкладками 5 кВ? Объем шара $V = \frac{4}{3} \pi R^3$.

3.156. Электрический диполь из двух жестко связанных точечных зарядов $+q$ и $-q$, расположенных на расстоянии l друг от друга, находится в положении устойчивого равновесия в однородном электрическом поле напряженностью E . Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть диполь на 180° ?

C5. Электрон влетает в однородное поле напряженностью $E = 120$ В/м и движется по направлению силовых линий. Какое расстояние он пролетит до полной остановки, если его начальная скорость равна 10^6 м/с? Сколько времени электрон будет двигаться до остановки?

C6. На тонком закрепленном кольце радиусом R равномерно распределен положительный заряд $q > 0$. Какую наименьшую скорость нужно сообщить находящейся в центре кольца частице массой m с отрицательным зарядом $-q$, чтобы она могла удалиться от кольца в бесконечность?

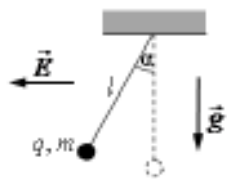


3.1.24. Два одинаковых маленьких шарика массами $m = 10$ г, заряженные одинаковыми зарядами $q = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл, закреплены на непроводящей нити, подвешенной на штативе. При какой длине l отрезка нити между шариками оба отрезка нити (верхний и нижний) будут испытывать одинаковое натяжение?

C7. Полый шарик массой $m = 0,4$ г с зарядом $q = 8$ нКл движется в горизонтальном однородном электрическом поле, напряженность которого $E = 500$ кВ/м. Какой угол α образует с вертикалью траектория шарика, если его начальная скорость равна нулю?

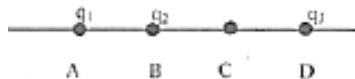
Задачи 3.1. Электрическое поле

С8. Какую работу необходимо совершить, чтобы три одинаковых точечных положительных заряда q , находящихся в вакууме на расстоянии r друг от друга вдоль одной прямой, расположить в вершинах равностороннего треугольника со стороной $r/2$?



С12. Маленький шарик массой m с зарядом $q=5$ нКл, подвешенный к потолку на лёгкой шёлковой нитке длиной $l=0,8$ м, находится в горизонтальном однородном электростатическом поле с модулем напряженности поля $E=6 \cdot 10^5$ В/м. Шарик отпускают с нулевой начальной скоростью из положения, в котором нить вертикальна. В момент, когда нить образует с вертикалью угол $\alpha=30^\circ$, модуль скорости шарика $V=0,9$ м/с. Чему равна масса шарика m ?

С13. Протон и α -частица движутся по одной прямой навстречу друг другу. В тот момент, когда расстояние между частицами было велико, скорость протона была равна $3 \cdot 10^5$ м/с, а скорость α -частицы 10^5 м/с. Определите, на какое наименьшее расстояние смогут сблизиться эти частицы.



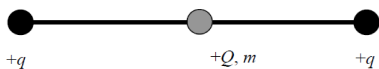
С14. Точки А, В, С и D расположены на прямой и разделены равными промежутками длины L (см, рис.). В точке А помещен заряд $q_1 = 8 \cdot 10^{-12}$ Кл, в точке В - заряд $q_2 = -5 \cdot 10^{-12}$ Кл. Какой заряд q_3 надо поместить в точку D, чтобы напряженность поля в точке С была равна нулю?

С15. Полый шарик массой $m = 0,4$ г с зарядом $q = 8$ нКл движется в однородном горизонтальном электрическом поле из состояния покоя. Траектория шарика образует с вертикалью угол $\alpha = 45^\circ$. Чему равен модуль напряженности электрического поля E ?

3.1.4. Внутри плоского незаряженного конденсатора, пластины которого расположены горизонтально на расстоянии $l = 2$ см, падает положительно заряженная пылинка. Вследствие сопротивления воздуха пылинка движется равномерно, проходя некоторый путь за время $t_0 = 10$ с. Когда на конденсатор подали напряжение $U = 1000$ В, пылинка начала двигаться равномерно вверх, пройдя тот же путь за время $t_1 = 5$ с. Определить отношение γ заряда пылинки к ее массе. Силу сопротивления воздуха считать пропорциональной скорости пылинки, ускорение свободного падения принять равным $g = 10$ м/с².

3.1.11. Две частицы с одинаковыми массами, заряженные равными по величине разноименными зарядами, движутся по окружности вокруг общего центра масс. Пренебрегая гравитационным взаимодействием между частицами, найти отношение α величин потенциальной и кинетической энергий частиц. Принять, что энергия взаимодействия частиц при их удалении на бесконечно большое расстояние равна нулю.

С17. Полый металлический шарик массой 2 г подвешен на шелковой нити длиной 50 см. Шарик имеет положительный заряд 10^{-8} Кл и находится в однородном электрическом поле напряженностью 10^6 В/м, направленном вертикально вниз. Чему равен период малых колебаний шарика?



С18. По гладкой горизонтальной направляющей длины $2l$ свободно скользит бусинка с положительным зарядом $Q > 0$ и массой m . На концах направляющей находятся положительные заряды $q > 0$ (см. рисунок). Бусинка совершает малые колебания относительно положения равновесия, период которых равен T . Чему будет равен период колебаний бусинки, если заряды на концах направляющей увеличить в 2 раза?

1. Положительный заряд Q равномерно распределен по тонкому проволочному кольцу радиуса R . В центре кольца находится точечная частица с зарядом $-q$ и массы m . Частице толчком сообщается начальная скорость V_0 вдоль оси кольца. Определите характер движения заряда в зависимости от начальной скорости, рассмотрев отдельно случай малых V_0 . Кольцо неподвижно.

ОТВЕТЫ:

$$9.13. \quad a_1 = \frac{a}{\sqrt[3]{4}} = 3,15 \text{ см};$$

$$1.5. \quad 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл};$$

$$10.10. \quad E = \frac{kq \cdot x}{(R^2 + x^2)^{3/2}}; \quad E_\infty = \frac{kq}{x^2}; \quad x_m = \frac{R}{\sqrt{2}};$$

$$2.5. \quad E_0 = \frac{3\sqrt{2} \cdot q}{2\pi\epsilon_0 a^2}; \quad \varphi_0 = 0;$$

$$4.6. \quad V_E = 8,4 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \quad V_c = 6 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \quad V_D = 0;$$

$$4.10. \quad 1,8 \text{ кВ};$$

$$3.1. \quad v_2 = \sqrt{v_1^2 - \frac{2e}{m} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} = 5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$3.2. \quad V_1 = \sqrt{\frac{kq^2}{6ml}}; \quad V_2 = -2V_1;$$

$$7.15. \quad \frac{q}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mL}} - \sqrt{\mu g L};$$

$$10.19. \quad R = \frac{e^2}{\pi\epsilon_0 m V^2};$$

$$10.9. \quad R = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 W_i} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

$$08.6.3. \quad V = \sqrt{\frac{2kq^2}{am} \left(2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)};$$

ОТВЕТЫ:

С9. 8,3 Г;

С10. $4.9 \cdot 10^{-5}$ Дж;

В3. 5000 В;

С1. 19,6 км/с;

С2. 7,5 см;

С3. 91 В;

С4. $-12,7 \cdot 10^{-19}$ Кл = $-8e$;

3.156. $A = 2qEl$;

С5. 2,4 см; 47 нс;

С6. $V = q \sqrt{\frac{2k}{mR}}$;

3.1.24. 0,6 м;

С7. 45^0 ;

Ответы:

C8. $\frac{7q^2k}{2r}$;

C12. $8,1 \cdot 10^{-4}$ кг;

C13. $4 \cdot 10^{-12}$ м;

C14. $-3 \cdot 10^{-12}$ Кл;

C15. 500 кВ/м;

3.1.4. $6 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг;

3.1.11. 2;

C17. 1,15 с;

C18. $T_1 = \frac{T}{\sqrt{2}}$;

1. При $V_0 \geq \sqrt{\frac{2kqQ}{mR}}$ частица улетает безвозвратно.

При $V_0 < \sqrt{\frac{2kqQ}{mR}}$ частица будет колебаться относительно центра кольца.

При $V_0 \ll \sqrt{\frac{kqQ}{mR}}$ колебания будут гармонические с периодом $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{mR^3}{kqQ}}$;