

§ 18. Электростатическое поле

Заряженные тела и частицы, которые кратко называют зарядами, взаимодействуют друг с другом. Это подтверждают многочисленные опыты, а закон Кулона позволяет определить силы взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Но что является причиной подобного взаимодействия, каков его механизм?

Первым, кто догадался, что «тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения», был выдающийся английский учёный Майкл Фарадей (1791–1867). Обобщая результаты собственных исследований, проведённых с 1832 по 1852 г., Фарадей ввёл в физику новое понятие — *поле*. Он рассматривал поле как материальную среду, которая является посредником при любых взаимодействиях удалённых друг от друга тел.

По современным представлениям, электрический заряд наделяет окружающее пространство особыми физическими свойствами — создаёт *электрическое поле*. Этот заряд называют источником поля и часто обозначают символом Q . Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд. Иначе говоря, заряды не действуют друг на друга непосредственно. Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей.

Так, например, при взаимодействии неподвижных электрических зарядов электростатическое поле заряда q_1 действует некоторой силой на заряд q_2 , а поле заряда q_2 действует на заряд q_1 . Эти взаимодействия передаются не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. По мере удаления от заряда-источника поле ослабевает.

Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами.

Электростатическое поле существует в пространстве, окружающем неподвижные заряды, неразрывно с ними связано и не изменяется со временем. Силу, которой поле действует на вносимый в него электрический заряд, называют *электрической силой* или кулоновской силой.

Чтобы исследовать электростатическое поле, создаваемое зарядом Q , в него помещают заряд q_0 , называемый пробным. Под *пробным зарядом* понимают заряд, модуль которого достаточно мал ($|q_0| \ll |Q|$) и собственное поле не меняет существенно распределения остальных зарядов, создающих исследуемое поле. Пробный заряд должен быть точечным, чтобы можно было исследовать

поле в малых областях пространства. Пробный заряд может быть как положительным, так и отрицательным.

Отметим, что свойство электрического поля воздействовать некоторой силой проявляется не только в точке, в которой находится пробный заряд q_0 . Это свойство присуще всем точкам поля, создаваемого зарядом Q .

Используя пробный заряд q_0 , можно количественно охарактеризовать электростатическое поле, создаваемое любым заряженным телом, указав модуль и направление силы, действующей на заряд q_0 в любой точке поля.



Из истории физики

По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самым важным открытием со времён Ньютона. Он писал, что «надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами». Фарадей создал концепцию электромагнитного поля, основанную на конечной скорости распространения любых взаимодействий. Математическую завершённость идее Фарадея придал его гениальный соотечественник и преемник Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879).



Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами

Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей

Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд

Пробный заряд q_0

$|q_0| \ll |Q|$, где Q — заряд-источник поля

точечный

может быть как положительным, так и отрицательным



1. Какие факты подтверждают существование электрического поля?
2. Какое поле называют электростатическим?
3. Каковы основные особенности электростатического поля?

§ 19. Напряжённость электростатического поля. Принцип суперпозиции

Для изучения свойств электростатического поля удобно использовать такую его характеристику, которая не зависит от числового значения пробного заряда и позволяет определить силу, действующую на заряд со стороны поля в любой его точке. Для гравитационного поля такой характеристикой, не зависящей от массы тела, является ускорение свободного падения $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$. Какая физическая величина является характеристикой электростатического поля?

Напряжённость электростатического поля. Пусть электростатическое поле создано в вакууме точечным зарядом $Q > 0$. Если в некоторую точку поля поместить пробный положительный заряд q_0 , на него будет действовать кулоновская сила отталкивания, модуль которой $F = k \frac{Qq_0}{r^2}$.

Сила \vec{F} не может служить характеристикой поля, так как её модуль пропорционален значению пробного заряда q_0 . Однако отношение модуля силы, которой электростатическое поле точечного заряда Q действует на пробный заряд q_0 , не зависит от значения пробного заряда:

$$\frac{F}{q_0} = k \frac{Q}{r^2} \quad (19.1)$$

и, следовательно, может служить характеристикой поля.

Эту характеристику называют *напряжённостью электростатического поля* и обозначают \vec{E} . Напряжённость характеризует силовое действие поля на вносимые в него заряды.

Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (19.2)$$

С учётом выражений (19.1) и (19.2) можно определить модуль напряжённости электростатического поля, созданного точечным зарядом Q , в точке, находящейся на расстоянии r от него:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Таким образом, модуль напряжённости поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом, прямо пропорционален модулю этого заряда и обратно пропорционален квадрату расстояния между зарядом и точкой, в которой определяют значение напряжённости.

Если заряд Q находится в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то модуль напряжённости поля $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$.

Из выражения $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ следует, что единицей напряжённости электростатического поля в СИ является ньютон на кулон $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$. В СИ широко используют другое название этой единицы — вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$.

Зная напряжённость электростатического поля, можно определить силу, действующую на любой точечный заряд в любой точке этого поля:

$$\vec{F} = \vec{E}q. \quad (19.3)$$

Напряжённость поля, как и сила, величина векторная. Направление напряжённости поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный электрический заряд. Напряжённость в любой точке электростатического поля точечного заряда направлена вдоль прямой, соединяющей эту точку и точечный заряд, создающий поле. Напряжённость поля, созданного точечным положительным зарядом $Q > 0$, направлена от заряда, а напряжённость поля, созданного точечным отрицательным зарядом $Q < 0$, — к заряду (рис. 104).

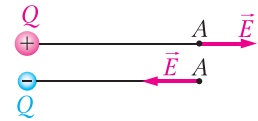


Рис. 104

От теории к практике

1. Как изменится модуль напряжённости в некоторой точке поля, созданного точечным зарядом Q , если: а) расстояние r от заряда до этой точки увеличить вдвое; б) заряд Q увеличить вдвое, а расстояние r от заряда до этой точки уменьшить вдвое?

2. Как направлена в точке A напряжённость поля, созданного неподвижным точечным зарядом (рис. 105)? Чему равен модуль напряжённости поля в этой точке?

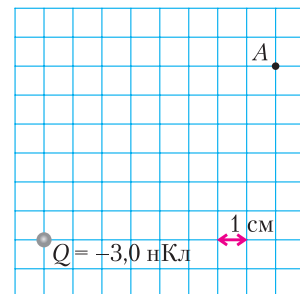


Рис. 105



Интересно знать

Кроме гравитационного поля у Земли есть электрическое и магнитное поля. Модуль напряжённости электрического поля у поверхности Земли в среднем составляет $130 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$. Электрическое поле Земли меняется во времени. Избыточный отрицательный электрический заряд земного шара колеблется около $-6 \cdot 10^5$ Кл.

Принцип суперпозиции электрических полей. Пусть пробный заряд q_0 находится в некоторой точке электростатического поля, созданного не одним, а несколькими точечными зарядами. Экспериментально установили, что результирующая сила, действующая на пробный заряд, равна векторной сумме сил, действующих со стороны электростатических полей этих точечных зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n. \quad (19.4)$$

Воспользовавшись формулой (19.3), можно определить силы, действующие на пробный заряд:

$$\vec{F} = \vec{E}q_0, \quad \vec{F}_1 = \vec{E}_1q_0, \quad \vec{F}_2 = \vec{E}_2q_0, \quad \vec{F}_3 = \vec{E}_3q_0, \quad \dots, \quad \vec{F}_n = \vec{E}_nq_0,$$

где \vec{E} — результирующая напряжённость поля системы точечных зарядов, а $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$ — напряжённости полей в данной точке, создаваемых 1-м, 2-м, 3-м, ... , n -м точечными зарядами.

Подставив эти выражения в соотношение (19.4), получим, что если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

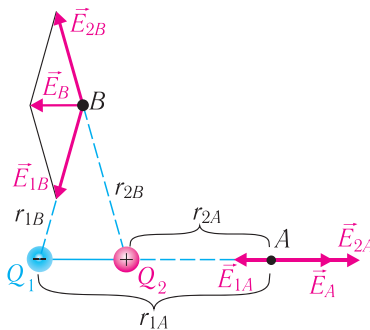


Рис. 106

Это положение называют *принципом суперпозиции полей*.

Воспользуемся принципом суперпозиции, чтобы определить в точках A и B напряжённости результирующего поля, созданного двумя точечными электрическими зарядами противоположных знаков $Q_1 < 0$ и $Q_2 > 0$, но с одинаковыми модулями (рис. 106).

Напряжённости \vec{E}_{1A} и \vec{E}_{2A} полей, созданных зарядами Q_1 и Q_2 , в точке A направлены вдоль

прямой, соединяющей заряды, в противоположные стороны. Напряжённость \vec{E}_A результирующего поля в точке A равна векторной сумме напряжённостей \vec{E}_{1A} и \vec{E}_{2A} и также направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Напряжённость \vec{E}_B результирующего поля в точке B , находящейся вне прямой, соединяющей заряды, равна векторной сумме напряжённостей \vec{E}_{1B} и \vec{E}_{2B} . Определить её можно по правилу параллелограмма (см. рис. 106).



От теории к практике

1. Чему равен модуль напряжённости поля, создаваемого точечным неподвижным зарядом Q_1 , в точке A (рис. 107)?

2. Где следует разместить ещё один такой же точечный заряд $Q_2 = Q_1$, чтобы в точке A модуль напряжённости результирующего поля оказался равным нулю?

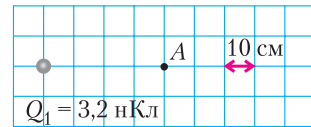


Рис. 107

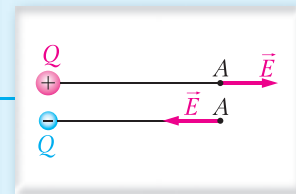


Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$

Модуль напряжённости поля, созданного точечным зарядом:

— в вакууме или в воздухе: $E = k \frac{|Q|}{r^2}$;

— в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ : $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$



Принцип суперпозиции: если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$





1. Что называют напряжённостью электростатического поля?
2. Как рассчитать напряжённость электростатического поля точечного заряда в некоторой точке этого поля?
3. Как определить силу, действующую со стороны электростатического поля, на внесённый в него точечный заряд?
4. Можно ли назвать ускорение свободного падения $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$ напряжённостью гравитационного поля?
5. Пробный заряд помещают в разные точки электростатического поля, созданного зарядом Q (рис. 108). В каких точках модуль напряжённости поля максимален? минимален? В каких точках он одинаков?
6. Как направлена напряжённость поля, созданного точечным зарядом $Q < 0$; точечным зарядом $Q > 0$?
7. В чём заключается принцип суперпозиции электростатических полей?

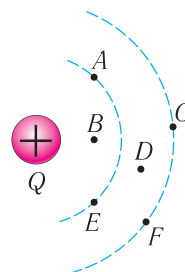


Рис. 108



Пример решения задачи

Два неподвижных точечных заряда $Q_1 = 6,70$ нКл и $Q_2 = -13,3$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $r = 5,00$ см друг от друга. Определите модуль напряжённости электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 3,00$ см от положительного заряда и $r_2 = 4,00$ см от отрицательного.

Дано:

$$Q_1 = 6,70 \text{ нКл} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = -13,3 \text{ нКл} =$$

$$= -1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4,00 \text{ см} = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$|\vec{E}| \text{ — ?}$$

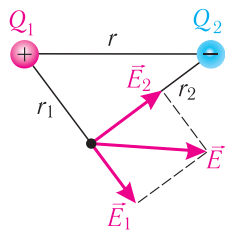


Рис. 109

Решение. Согласно принципу суперпозиции, напряжённость результирующего поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис. 109) определяют по правилу параллелограмма. Здесь \vec{E}_1 и \vec{E}_2 — напряжённости полей, создаваемых точечными зарядами Q_1 и Q_2 в данной точке. Из условия задачи и теоремы Пифагора следует, что угол между \vec{E}_1 и \vec{E}_2 прямой.

Модуль напряжённости E результирующего поля найдём по теореме Пифагора: $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$. Так как заряды Q_1 и Q_2 точечные, то

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, \quad E_2 = k \frac{|Q_2|}{r_2^2}.$$

$$\text{С учётом этого } E = k \sqrt{\left(\frac{Q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{r_2^2}\right)^2}.$$

$$E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{\left(\frac{6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} \right)^2 + \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{(4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} \right)^2} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Ответ: $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$



Упражнение 14

1. В некоторую точку электростатического поля, в которой модуль напряжённости $E = 160 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, помещают точечный заряд $q = 4,00$ нКл. Определите модуль силы, действующей на этот заряд со стороны электростатического поля.

2. Определите модуль точечного заряда, находящегося в воздухе, если на расстоянии $r = 1,0$ см от заряда модуль напряжённости поля $E = 3,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

3. Два положительных точечных заряда находятся на расстоянии $r_0 = 10$ см друг от друга. В точке, расположенной на прямой, соединяющей заряды, на расстоянии $r_1 = 8,0$ см от первого заряда модуль напряжённости результирующего электростатического поля равен нулю. Определите отношение зарядов $\frac{Q_1}{Q_2}$.

4. Электростатическое поле в точке создано неподвижными точечными зарядами $Q_1 = -4Q$ и $Q_2 = Q$ (рис. 110).

а) Изобразите в выбранном вами масштабе напряжённости \vec{E}_{1A} и \vec{E}_{2A} полей, созданных каждым зарядом в точке A .

б) Обозначьте на рисунке направление результирующей напряжённости \vec{E}_A .

в) Определите модуль результирующей напряжённости E_A поля, если $|Q| = 8,0$ нКл.

5. Пылинка массой $m = 2,5 \cdot 10^{-8}$ г имеет заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-12}$ Кл. Напряжённость поля в точке, где находится пылинка, направлена вертикально вверх. Определите модуль напряжённости электростатического поля, если пылинка находится в равновесии.

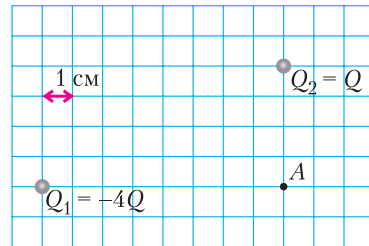


Рис. 110



§ 20. Линии напряжённости электростатического поля

Для описания электростатического поля нужно знать как модуль, так и направление напряжённости в каждой его точке. Чтобы наглядно отображать распределение поля в пространстве, Фарадей в 1845 г. предложил способ изображения электрических полей в виде воображаемых линий. Их назвали линиями напряжённости или силовыми линиями.

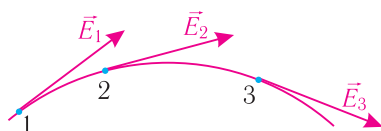


Рис. 111

Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля в той же точке (т. е. с направлением электростатической силы, действующей на положительный заряд) (рис. 111).

Очевидно, что через любую точку поля, в которой $\vec{E} \neq \vec{0}$, можно провести одну и только одну линию напряжённости. В каждой такой точке напряжённость имеет вполне определённое направление.

На рисунке 112, *a* изображены линии напряжённости полей, образованных зарядами, равномерно распределёнными по поверхности уединённых проводящих шариков. Направление каждой стрелки на рисунке 112, *a* совпадает с направлением напряжённости поля. Линии напряжённости в первом случае направлены от положительного заряда в бесконечность, а во втором — из бесконечности к отрицательному заряду и оканчиваются на нём. В электростатическом поле линии напряжённости начинаются и оканчиваются на электрических зарядах даже тогда, когда одним своим концом уходят в бесконечность, где и находятся недостающие на рисунке заряды.

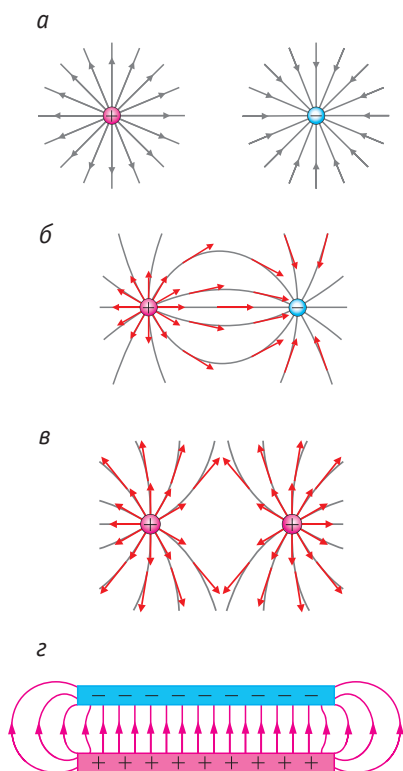


Рис. 112

На рисунке 112, *б* изображены линии напряжённости электростатического поля, образованного двумя разноимёнными зарядами, модули которых одинаковые, находящимися на проводящих шариках. Стрелки показывают направления напряжённости поля в различных его точках.

На рисунке 112, *в* представлены линии напряжённости электростатического поля двух одинаково заряженных шариков.

На рисунке 112, *г* изображено поле, созданное зарядами противоположных знаков, модули которых одинаковые, находящимися на двух плоских металлических пластинах, длина которых много больше расстояния между ними. Линии напряжённости такого поля параллельны друг другу за исключением пространства вблизи краёв пластин и вне области их перекрытия. Электростатическое поле в центральной области между разноимённо заряженными металлическими пластинами является примером *однородного поля*.

Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого во всех точках пространства одинакова.

Электростатические поля, изображённые на рисунках 112, *а*, *б*, *в*, являются неоднородными, так как или модуль, или направление (или и то, и другое) напряжённости в разных точках поля отличается.

Линии напряжённости электростатического поля не прерываются в пространстве (при отсутствии в нём других зарядов), никогда не пересекаются и не касаются друг друга.

Чтобы линии напряжённости отображали не только направление, но и модуль напряжённости поля, на рисунках их условились проводить с определённой густотой. Линии напряжённости идут гуще там, где модуль напряжённости поля больше, и реже там, где он меньше. В однородном электростатическом поле густота линий напряжённости не меняется. Картину линий напряжённости принято строить так, чтобы она, по возможности, отображала симметрию изображаемого электростатического поля. Число линий напряжённости, началом или концом которых служит данный заряд, пропорционально значению этого заряда (рис. 113).

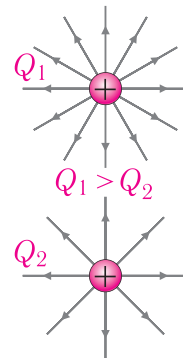
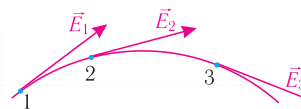


Рис. 113



Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля



начинаются на положительном заряде и оканчиваются на отрицательном заряде тел

не пересекаются, так как в каждой точке поля напряжённость имеет одно конкретное направление

не прерываются в пространстве, не содержащем электрических зарядов

по густоте линий можно судить о модуле напряжённости электростатического поля

Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого в любой его точке одинакова



1. Что называют линиями напряжённости электростатического поля?
2. Каковы особенности линий напряжённости электростатического поля?
3. Как направлены линии напряжённости электростатического поля заряда в зависимости от его знака? системы двух зарядов (одноимённых и разноимённых)?
4. Какое электростатическое поле называют однородным? Приведите примеры.

§ 21. Работа силы однородного электростатического поля. Потенциал

Электростатическое поле, действуя на находящиеся в нём заряды с определённой силой, может их перемещать. Вы знаете, что при перемещении тела действующая на него сила совершает работу. Выясним, от чего зависит работа силы по перемещению электрического заряда в электростатическом поле.

Работа силы однородного электростатического поля. Расчёты и результаты экспериментов доказали, что работа силы электростатического поля при перемещении заряда между двумя точками зависит только от положения этих точек