

Напряжённость электрического поля

Темы кодификатора ЕГЭ: действие электрического поля на электрические заряды, напряжённость электрического поля, принцип суперпозиции электрических полей.

Основной закон электростатики — закон Кулона — позволяет вычислить силу взаимодействия двух точечных зарядов. Данный закон, однако, ничего не говорит нам о том, *каким образом* осуществляется это взаимодействие.

Дальнодействие и близкодействие

Опыт показывает, что электрические заряды действуют друг на друга даже в отсутствие между ними вещества, то есть в вакууме. Поэтому долгое время в науке преобладала *теория дальнодействия*. Эта теория утверждала, что один заряд действует на другой непосредственно, без участия какого-то промежуточного агента¹. В частности, изменение взаимного расположения зарядов приводит к мгновенному изменению силы их взаимодействия.

Противоположной точкой зрения служила *теория близкодействия*. Согласно этой теории, для взаимодействия тел нужен промежуточный агент — физический объект, передающий взаимодействие от одной точки пространства к другой. В частности, скорость передачи взаимодействий конечна: при изменении положения одного из зарядов другой заряд «почувствует» это изменение не сразу, а спустя некоторый интервал времени.

Что же это за промежуточный объект, передающий взаимодействие, если заряды могут действовать друг на друга сквозь пустоту? Данный вопрос был одним из главных возражений сторонников дальнодействия, среди которых были крупнейшие физики и математики своего времени (Кулон, Ампер, Лаплас).

Электрическое поле

Тем не менее, теория близкодействия одержала верх. Физическим объектом, передающим взаимодействие между зарядами даже сквозь пустоту, оказалось *электромагнитное поле*. Решающими здесь оказались идеи и труды двух великих учёных XIX столетия — Фарадея и Максвелла. Экспериментальным подтверждением теории близкодействия явилось открытие электромагнитных волн.

Неподвижные заряды не создают магнитного поля; поэтому, пока мы изучаем электростатику, мы будем говорить только об электрическом поле. Итак:

Электрический заряд создаёт вокруг себя электрическое поле, которое, в свою очередь, действует с некоторой силой на другие заряды.

Электрическое поле не нуждается в какой-то специальной среде, которая являлась бы его носителем. Оно может возникать как в веществе, так и в вакууме, и является, наряду с веществом, альтернативной формой существования материи.

По современным физическим представлениям электрическое поле является первичным физическим объектом: мы пока не можем сказать, каково его внутреннее устройство (точно так же мы не можем сказать, например, из чего состоит электрон). Мы можем лишь изучать свойства электрического поля, устанавливать законы его поведения и использовать эти законы в своих целях.

¹С этой же точки зрения рассматривалось и гравитационное взаимодействие тел.

Источниками электрического поля являются электрические заряды. Индикатором для обнаружения поля также является электрический заряд — так называемый *пробный заряд*. По действию на пробный заряд мы и можем судить о наличии электрического поля в данной области пространства. Кроме того, с помощью пробного заряда мы можем исследовать величину поля в различных пространственных точках. Разумеется, для этого пробный заряд должен быть точечным.

Опыт показывает, что сила, с которой поле действует на пробный заряд, прямо пропорциональна величине заряда. Поэтому отношение силы к заряду уже не зависит от величины заряда и является характеристикой поля.

Напряжённость электрического поля — это отношение вектора силы \vec{F} , с которой поле действует на пробный заряд q , к самому пробному заряду (с учётом его знака):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Напряжённость поля, как видим, является векторной величиной. В каждой точке пространства электрическое поле характеризуется вектором напряжённости. Поле считается заданным, если нам известна зависимость вектора напряжённости от координат точки и, вообще говоря, от времени.

Как следует из определения, напряжённость измеряется в Н/Кл. Общепринятая единица напряжённости есть В/м. Мы скоро увидим, что это одно и то же.

Если напряжённость поля известна, то формула (1) позволяет найти силу, которая действует на точечный заряд со стороны электрического поля:

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

Сила и напряжённость, таким образом, являются коллинеарными векторами. Если заряд положительный, то сила направлена в ту же сторону, что и напряжённость. Если заряд отрицательный, то сила направлена противоположно напряжённости.

Одна из основных задач электростатики — нахождение напряжённости поля, создаваемого данной системой зарядов. Рассмотрим некоторые примеры.

Напряжённость поля точечного заряда

Определение модуля и направления вектора напряжённости поля точечного заряда — это самая простая и легко решаемая задача.

Рассмотрим положительный точечный заряд q , находящийся в вакууме. Поместим на расстоянии r от него положительный пробный заряд q_0 . Со стороны заряда q на пробный заряд действует сила отталкивания, поэтому *напряжённость поля положительного заряда q направлена от него* (рис. 1):



Рис. 1. Напряжённость поля положительного заряда

Величина силы отталкивания равна:

$$F = \frac{kqq_0}{r^2}.$$

Делим силу на пробный заряд q_0 и находим модуль напряжённости поля заряда q :

$$E = \frac{kq}{r^2}. \quad (2)$$

Пусть теперь заряд, создающий поле, будет отрицательным; модуль этого заряда также обозначаем q . Сила, действующая на положительный пробный заряд, станет силой притяжения. Поэтому *напряжённость поля отрицательного заряда направлена к нему* (рис. 2):

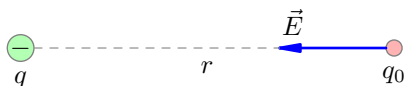


Рис. 2. Напряжённость поля отрицательного заряда

Модуль напряжённости поля снова находится по формуле (2).

Если заряд q находится в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то сила его действия на пробный заряд уменьшается в ϵ раз:

$$F = \frac{kqq_0}{\epsilon r^2}.$$

Следовательно, в ϵ раз уменьшается и напряжённость поля:

$$E = \frac{kq}{\epsilon r^2}. \quad (3)$$

Модуль напряжённости поля точечного заряда q находится по формуле (2) в вакууме и по формуле (3) в диэлектрической среде. Вектор напряжённости в данной точке направлен вдоль прямой, соединяющей точку с зарядом: от заряда при $q > 0$ и к заряду при $q < 0$.

По мере удаления от заряда модуль напряжённости поля убывает пропорционально квадрату расстояния от точки наблюдения до заряда. На рис. 3) дано примерное графическое представление электрического поля точечного заряда в пространстве (показаны векторы напряжённости поля в различных точках).

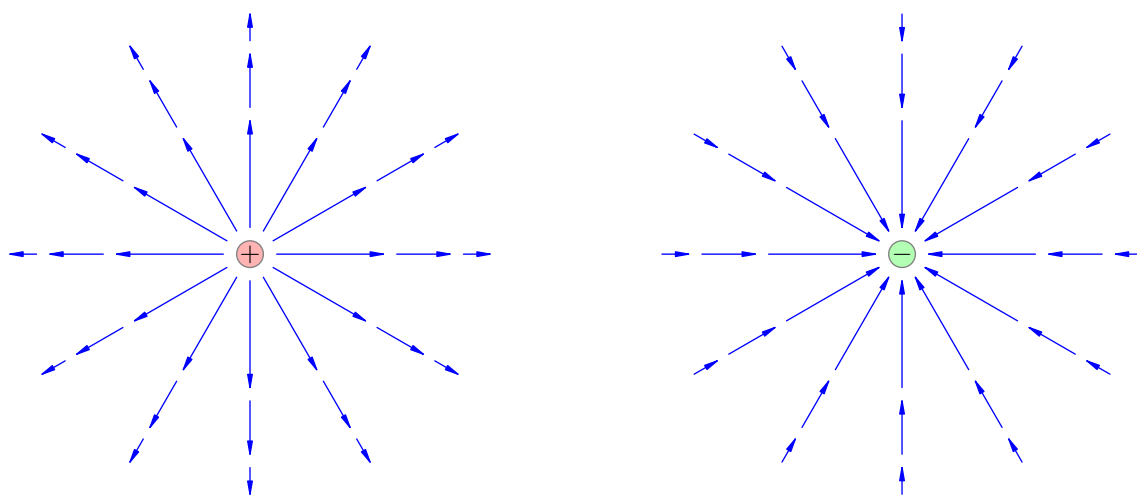


Рис. 3. Векторы напряжённости поля точечного заряда

Рябит в глазах, не правда ли? Ниже мы познакомимся с более удобным способом изображения поля — линиями напряжённости.

Принцип суперпозиции электрических полей

Начнём со случая двух зарядов. Пусть положительный заряд q_1 создаёт в точке M электрическое поле \vec{E}_1 , и пусть отрицательный заряд q_2 создаёт в этой же точке поле \vec{E}_2 . Какое поле создадут в точке M оба заряда вместе?

Поместим в точку M пробный заряд q . Тогда со стороны заряда q_1 на него будет действовать сила \vec{F}_1 , а со стороны заряда q_2 — сила \vec{F}_2 . Согласно принципу суперпозиции, с которым вы познакомились в предыдущем листке, на заряд q действует результирующая сила

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Поделим данное равенство на пробный заряд q :

$$\frac{\vec{F}}{q} = \frac{\vec{F}_1}{q} + \frac{\vec{F}_2}{q}.$$

С учётом определения (1) напряжённости поля получаем:

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

Таким образом, напряжённость результирующего поля в точке M оказывается равна векторной сумме напряжённостей полей каждого из зарядов (рис. 4):

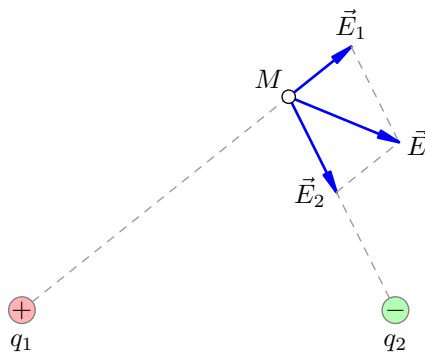


Рис. 4. Принцип суперпозиции полей

Напряжённости полей складываются векторно и в общем случае. В самом деле, поделив формулу $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ на пробный заряд q , приходим к общей формулировке принципа суперпозиции.

Принцип суперпозиции. Пусть заряды q_1, q_2, \dots, q_n по отдельности создают в данной точке поля $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$. Тогда система этих зарядов создаёт в данной точке поле \vec{E} , равное векторной сумме напряжённостей полей отдельных зарядов:

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

С помощью принципа суперпозиции можно найти напряжённость поля любой системы зарядов — разбивая систему на малые заряды, которые можно считать точечными, с последующим суммированием напряжённостей малых зарядов. Обычно это приводит к достаточно сложным вычислениям.

Поле равномерно заряженной плоскости

Важным примером системы зарядов является заряженная плоскость. В качестве бесконечной плоскости мы можем рассматривать любую плоскую пластину, если расстояние от точки, в которой ищется поле, до пластины много меньше размеров самой пластины. Именно такая ситуация возникает в случае плоского конденсатора: расстояние между его обкладками много меньше размеров обкладок, так что поле внутри конденсатора можно вычислять как суперпозицию полей двух заряженных плоскостей.

Заряженная плоскость характеризуется величиной поверхностной плотности заряда. Что это такое? Возьмём небольшой участок плоскости площадью S . Пусть заряд этого участка равен q . Тогда *поверхностная плотность заряда* определяется как отношение заряда к площади:

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Иными словами, поверхностная плотность заряда — это заряд единицы площади.

Поверхностная плотность заряда может меняться от участка к участку. Но если на любом участке плоскости поверхностная плотность заряда одинакова ($\sigma = \text{const}$, т. е. заряд распределён равномерно), то плоскость называется *равномерно заряженной*.

Вектор напряжённости поля равномерно заряженной плоскости перпендикулярен плоскости; он направлен *от плоскости*, если плоскость заряжена положительно, и *к плоскости*, если плоскость заряжена отрицательно (рис. 5).

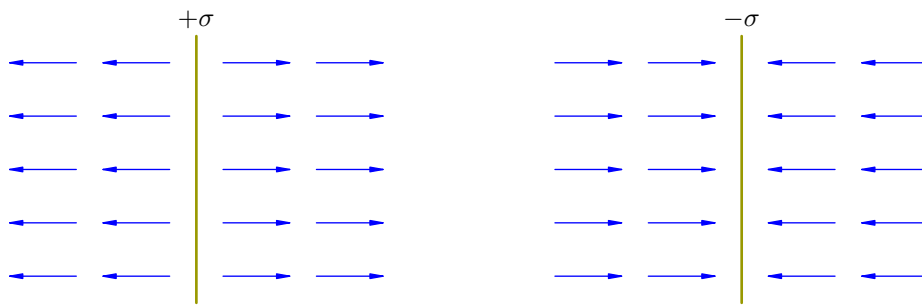


Рис. 5. Поле равномерно заряженной плоскости

Самое удивительное заключается в том, что величина напряжённости поля *не зависит* от расстояния до плоскости. Она равна:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \quad (4)$$

Эта формула справедлива для вакуума. В среде с диэлектрической проницаемостью ε поле, как обычно, уменьшается в ε раз:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (5)$$

Пример заряженной плоскости важен потому, что мы встречаемся здесь с понятием *однородного поля*. Электрическое поле в данной области пространства называется *однородным*, если вектор напряжённости поля одинаков в каждой точке области. Иными словами, напряжённость поля в каждой точке рассматриваемой области имеет одно и то же направление и неизменную величину.

Поле точечного заряда, например, не является однородным. В самом деле, напряжённость поля точечного заряда может меняться от точки к точке как по величине, так и по направлению (она обратно пропорциональна квадрату расстояния до заряда и направлена вдоль прямой, соединяющей заряд с точкой наблюдения).

А вот *заряженная плоскость создаёт однородное электрическое поле в каждом из полупространств, на которые она разбивает пространство*. Напряжённость этого поля вычисляется по формулам (4) или (5).

Линии напряжённости электрического поля

Давайте вернёмся к пространственной картине поля точечного заряда. Вместо векторов напряжённости в разных точках нарисуем более приятные глазу *линии напряжённости* (рис. 6):

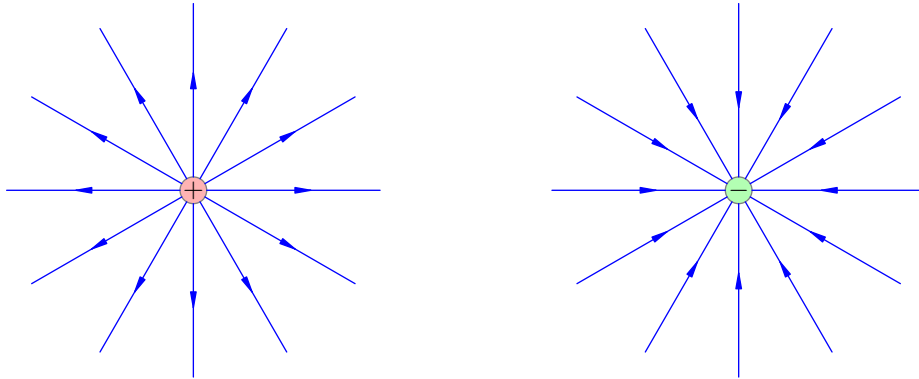


Рис. 6. Линии напряжённости поля точечного заряда

Линии напряжённости идут вдоль векторов напряжённости, указывают направление этих векторов и даже содержат информацию об их абсолютных величинах: чем гуще расположены линии напряжённости, тем больше величина напряжённости поля в данной области пространства.

Аналогичную картину линий напряжённости мы можем нарисовать и для заряженной плоскости (рис. 7). Как видим, *линии напряжённости однородного поля являются участками параллельных прямых*.

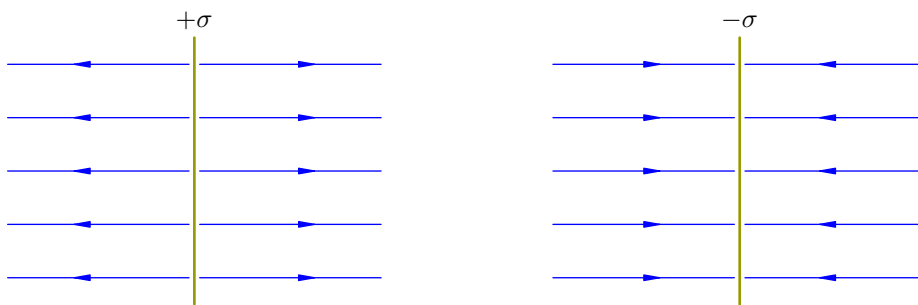


Рис. 7. Линии напряжённости поля заряженной плоскости

Линии напряжённости можно провести и в произвольном электрическом поле. Каким образом? *В каждой точке пространства вектор напряжённости поля направлен по касательной к линии напряжённости*. Линии напряжённости как бы «подстраиваются» под векторы напряжённости, «обтекая» их по касательной (рис. 8):

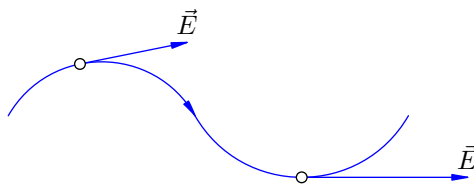


Рис. 8. Линия напряжённости

Линии напряжённости всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.