

В. Н. Ластовирия, Р. В. Родякина

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ЯВЛЕНИЯ В СВАРОЧНОЙ
ТЕХНИКЕ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 621.791:537

ББК 34.641:22.33

Л26

Рецензенты:

Коновалов Алексей Викторович, д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана;

*Музыка Андрей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доц. Московского
политехнического университета*

Ластовирия, В. Н.

Л26 Физические процессы и явления в сварочной технике : учебное пособие / В. Н. Ластовирия, Р. В. Родякина. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 160 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0567-6

Рассмотрены основные физические процессы и явления, на которых базируется современная сварочная техника – источники питания, сварочные установки и оборудование для сварки плавлением и давлением. Приведены примеры формирования сварочных источников энергии.

Для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» с профилем подготовки «Оборудование и технология сварочного производства». Может быть полезно студентам других, близких направлений и инженерно-техническим работникам сварочного производства.

УДК 621.791:537

ББК 34.641:22.33

ISBN 978-5-9729-0567-6

© Ластовирия В. Н., Родякина Р. В., 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Электростатическое поле и его характеристики	6
1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда	6
1.2. Закон Кулона.....	8
1.3. Напряженность электрического поля.....	12
1.4. Теорема Гаусса.....	15
1.5. Циркуляция вектора напряженности. Потенциал.....	19
1.6. Связь между потенциалом и вектором напряженности	24
1.7. Движение электронов в электростатическом поле	27
1.8. Ускорение электронов в электростатическом поле	29
Глава 2. Проводник в электростатическом поле.....	32
2.1. Поле в веществе	32
2.2. Поле внутри и снаружи проводника	34
2.3. Электрическая емкость уединенного проводника	38
2.4. Взаимная электрическая емкость двух проводников. Конденсаторы.....	41
2.5. Энергия заряженных проводников.....	44
2.6. Энергия электрического поля	46
Глава 3. Постоянный электрический ток.....	49
3.1. Электрический ток. Плотность тока. Уравнение непрерывности	49
3.2. Закон Ома для однородного проводника.....	51
3.3. Обобщенный закон Ома	54
3.4. Закон Джоуля – Ленца.....	57
3.5. Переходные процессы в цепи с конденсатором.....	59
3.6. Использование тепла проходящего тока при сварке	63
Глава 4. Электрический ток в вакууме, газах и плазме	67

4.1. Работа выхода электрона из металла.	
Термоэлектронная эмиссия	67
4.2. Простейшие генераторы электронных пучков	71
4.3. Электропроводность газов	75
4.4. Несамостоятельный газовый разряд	78
4.5. Самостоятельный газовый разряд	80
4.6. Особенности дугового разряда	82
Глава 5. Магнитные процессы и явления	87
5.1. Магнитное поле электрического тока	87
5.2. Магнитная индукция. Сила Лоренца.....	91
5.3. Движение электронов в магнитном поле.....	95
5.4. Собственное магнитное поле дуги	98
5.5. Магнитный поток. Основные законы магнитного поля	101
5.6. Магнитное поле в веществе	105
5.7. Вектор H – напряженность магнитного поля	108
Глава 6. Явление электромагнитной индукции	112
6.1. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.....	112
6.2. Природа электромагнитной индукции.....	115
6.3. Явление самоиндукции	119
6.4. Взаимная индукция.....	121
6.5. Электрический трансформатор.....	122
Глава 7. Колебания. Переменный электрический ток.....	127
7.1. Классификация колебаний. Уравнение колебаний груза на пружине	127
7.2. Гармонические колебания.....	130
7.3. Электрические колебания	135
7.4. Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Формула Томсона. Переменный ток	139
7.5. Резистор, конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока	144
7.6. Закон Ома для цепи переменного тока	149
7.7. Мощность в цепи переменного тока	152
Заключение	157
Библиографический список	158

ВВЕДЕНИЕ

Современная сварочная техника является прогрессивным и высокоорганизованным электрическим оборудованием, которое на основе, в первую очередь, электрических и магнитных процессов и явлений формирует источники энергии для сварки.

Для сварки плавлением такими источниками энергии являются: электрическая дуга, электронный пучок, лазерный луч, электрический ток и др. Источники энергии обеспечивают в зоне сварки требуемую концентрацию тепловой энергии, необходимую для нагрева и проплавления металла на заданную глубину при формировании сварного шва.

То же можно сказать и об источниках энергии для сварки давлением (контактная сварка), где в процессе нагрева проходящим электрическим током для образования сварного соединения применяется механическая энергия сил давления.

Для понимания и анализа сути происходящих процессов необходимо знать основные разделы курсов электричества и магнетизма, а также гармонических колебаний, в первую очередь электрических, поскольку в сварочной технике используется также переменный электрический ток, возникающий в проводниках под действием источников переменного напряжения.

Учебное пособие содержит семь глав: «Электростатическое поле и его характеристики», «Проводник в электростатическом поле», «Постоянный электрический ток», «Электрический ток в вакууме, газах и плазме», «Магнитные процессы и явления», «Явление электромагнитной индукции», «Колебания. Переменный электрический ток». Последовательно излагаются физические основы процессов и явлений, на которых базируется сварочная техника. Приводятся примеры формирования сварочных источников энергии.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение», профиль подготовки «Оборудование и технология сварочного производства». Кроме того, может быть полезно студентам, других близких направлений и инженерно-техническим работникам сварочного производства.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

В настоящее время известно, что в основе всего разнообразия явлений природы лежат четыре фундаментальных взаимодействия между телами и частицами – сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Каждый вид взаимодействия связывается с определенной характеристикой частицы. Например, гравитационное взаимодействие зависит от масс частиц, электромагнитное – от электрических зарядов.

Согласно современным представлениям взаимодействие между зарядами осуществляется через электрическое поле. Всякий электрический заряд q изменяет определенным образом свойства окружающего его пространства – создает электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещенный в какую-либо его точку другой («пробный») заряд испытывает действие силы.

Взаимодействие между электрически заряженными частицами или телами, движущимися произвольным образом относительно инерциальной системы отсчета, осуществляется посредством *электромагнитного поля*, которое представляет собой совокупность двух взаимосвязанных полей: *электрического и магнитного*.

Характерная особенность электрического поля, отличающая его от других физических полей, состоит в том, что оно действует на электрический заряд (заряженную частицу или тело) с силой, которая не зависит от скорости движения заряда. Поэтому обнаружить электрическое поле удобно по его силовому действию на помещенный в поле неподвижный электрический заряд.

Электрическое поле неподвижных электрических зарядов, осуществляющее взаимодействие между ними, называется *электростатическим полем*.

Силы, действующие на заряды (заряженные частицы) со стороны электростатического поля, называются электростатическими силами.

Электродинамикой называется раздел классической физики, в котором изучаются законы электромагнитного поля. Соответственно теория электростатического поля неподвижных электрических зарядов рассматривается в разделе электродинамики, называемом *электростатикой*.

В природе существуют два рода электрических зарядов: *положительные* и *отрицательные*. Положительный заряд возникает, например, на стекле, натертом кожей, а отрицательный – на эбоните или янтаре, натертом шерстью. Разноименно заряженные тела притягиваются, а одноименно заряженные отталкиваются друг от друга.

Точечным зарядом называется заряженное тело, форма и размеры которого несущественны в данной задаче. Например, рассматривая электростатическое взаимодействие двух тел, их можно считать точечными электрическими зарядами, если размеры этих тел малы по сравнению с расстоянием между ними.

Электрический заряд любой системы тел состоит из целого числа *элементарных зарядов*, приближенно равных $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Наименьшей по массе частицей, имеющей отрицательный элементарный заряд, является *электрон*. Масса электрона приближенно равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Наименьшая по массе устойчивая частица с положительным элементарным зарядом – *протон*, представляющий собой ядро атома наиболее распространенного в природе изотопа водорода. Масса протона приближенно равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Электроны и протоны входят в состав всех атомов и молекул.

Наименьшая по массе античастица, имеющая элементарный положительный заряд, – *позитрон*. Позитрон является античастицей электрона и имеет равную с ним массу.

Система тел или частиц называется *электрически изолированной системой*, если между ней и внешними телами нет обмена электрическими зарядами (электрически заряженными частицами).

Опыты показывают, что в результате соприкосновения при трении двух электрически нейтральных тел заряды переходят от одного тела к другому. В каждом из них нарушается равенство сумм положительных и отрицательных зарядов – тела заряжаются разноименно. При электризации тела действием поля в нем нарушается равномерное распределение положительных и отрицательных зарядов. Они перераспределяются так, что в одной части тела возникает избыток положительных зарядов, а в другой – отрицательных. Однако в обоих случаях выполняется следующий фундаментальный закон физики – закон сохранения электрического заряда: *алгебраическая сумма*

электрических зарядов тел или частиц, образующих электрически изолированную систему, не изменяется при любых процессах, происходящих в этой системе.

В системе могут образовываться новые электрически заряженные частицы, например электроны вследствие ионизации атомов и молекул, ионы за счет явления ионизации или электролитической диссоциации и др. Однако при этом одновременно рождаются частицы, заряды которых противоположны по знаку и в сумме равны нулю. Например, при ионизации атома образуется пара частиц – свободный электрон и однозарядный положительный ион.

Таким образом, электрическому заряду частицы присущи следующие фундаментальные свойства:

- 1) электрический заряд существует в двух видах: как положительный, так и отрицательный;
- 2) в любой электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов не изменяется, это утверждение выражает закон сохранения электрического заряда;
- 3) электрический заряд является релятивистски инвариантным: его величина не зависит от системы отсчета, а значит, не зависит от того, движется он или покоится.

1.2. Закон Кулона

Силы взаимодействия неподвижных электрических зарядов подчиняются основному закону электростатического взаимодействия, который был экспериментально установлен Ш. Кулоном (1785) с помощью крутильных весов. Поэтому силы электростатического взаимодействия часто называют *кулоновскими силами*. Закон Кулона утверждает, что *сила электростатического взаимодействия двух точечных электрических зарядов, находящихся в вакууме, прямо пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами и направлена вдоль соединяющей их прямой*:

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r}. \quad (1.1)$$

Здесь \mathbf{F}_{12} – сила, действующая на заряд q_1 со стороны заряда q_2 ;
 \mathbf{r}_{12} – радиус-вектор, соединяющий заряд q_2 с зарядом q_1 ;

$r = |\mathbf{r}_{12}|$ (рис. 1.1);

k – коэффициент пропорциональности ($k > 0$).

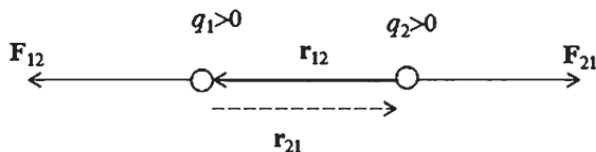


Рисунок 1.1

Коэффициент пропорциональности k в законе Кулона (1.1) зависит от выбора системы единиц. В СИ принимается, что коэффициент k – величина размерная и равная

$$k = 1/(4\pi\epsilon_0), \quad (1.2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) – электрическая постоянная, а множитель 4π для записи закона в рационализованной форме:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}_{12}. \quad (1.3)$$

Для оценки только величины (модуля) силы можно воспользоваться скалярным выражением закона Кулона, содержащим модули зарядов:

$$|\mathbf{F}_{12}| = |\mathbf{F}_{21}| = F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (1.4)$$

Такую форму имеет закон всемирного тяготения, только вместо зарядов в него входят массы, а роль коэффициента k играет гравитационная постоянная. Поскольку масса всегда положительна, то гравитационные силы всегда являются силами притяжения. Кулоновские силы могут быть как силами притяжения, так и отталкивания, в зависимости от знака электрических зарядов.

В международной системе единиц СИ единица заряда *кулон* (Кл) вводится с помощью единицы силы тока – ампер (А): *1 Кл – это заряд, проходящий*

за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока в 1 А. 1 Кл – это большая величина. Два таких заряда разного знака на расстоянии в 1 км притягиваются с силой, с которой земной шар притягивает груз массой в 1 тонну. Сообщить такой заряд небольшому телу невозможно, поскольку заряды одного знака не смогли бы на нём удержаться из-за кулоновских сил отталкивания. Но в проводнике, который в целом нейтрален, привести в движение заряд в 1 Кл нетрудно (в электрической лампе мощностью 200 Вт при напряжении сети 220 В протекает ток немного меньше 1 А).

Всякое заряженное тело можно рассматривать как совокупность точечных зарядов аналогично тому, как в механике всякое тело можно считать совокупностью материальных точек. Поэтому электростатическая сила, с которой одно заряженное тело действует на другое, равна геометрической сумме сил, приложенных ко всем точечным зарядам второго тела со стороны каждого точечного заряда первого тела.

Часто бывает значительно удобнее считать, что заряды распределены в заряженном теле *непрерывно* – вдоль некоторой линии (например, в случае заряженного тонкого стержня), поверхности (например, в случае заряженного проводника) или объема. Соответственно пользуются понятиями линейной, поверхностной и объемной плотностей зарядов.

Линейная плотность электрических зарядов:

$$\tau = dq/dl, \quad (1.5)$$

где dq – заряд малого участка заряженной линии длиной dl .

Поверхностная плотность электрических зарядов:

$$\sigma = dq/dS, \quad (1.6)$$

где dq – заряд малого участка заряженной поверхности площадью dS .

Объемная плотность электрических зарядов:

$$\rho = dq/dV, \quad (1.7)$$

где dq – заряд малого элемента заряженного тела объемом dV .

Расчеты показывают, что закон Кулона в форме (1.3) справедлив также для электростатического взаимодействия заряженных тел *шарообразной формы*, если заряды q_1 и q_2 распределены *равномерно* по всему объему или

по всей поверхности этих тел. При этом радиусы тел могут быть соизмеримы с расстоянием r между их центрами.

Взаимодействие неподвижных зарядов в диэлектрике. Силы взаимодействия заряженных тел зависят от свойств среды, в которой они находятся. Пусть заряженные шарики помещены внутрь однородного изолятора или диэлектрика.

При этом лучше использовать жидкий диэлектрик (керосин, масло и т.д.), так как измерить силу взаимодействия заряженных тел внутри твердого диэлектрика трудно из-за возникающих в нем упругих напряжений.

Сила взаимодействия между зарядами в однородном диэлектрике, как показывает опыт, всегда меньше, чем в вакууме. Причем *отношение силы F_0 взаимодействия зарядов в вакууме к силе F взаимодействия этих же зарядов на том же расстоянии в среде не зависит ни от самих зарядов, ни от расстояния между ними.* Оно определяется только свойствами среды. Если обозначить это отношение через ϵ , то

$$\frac{F_0}{F} = \epsilon. \quad (1.8)$$

Отсюда следует, что закон Кулона для взаимодействия зарядов в среде имеет вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}. \quad (1.9)$$

Величину ϵ называют диэлектрической проницаемостью среды. *Диэлектрическая проницаемость среды – это физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме.* Она является безразмерной величиной. Для вакуума $\epsilon = 1$. Для некоторых диэлектриков её значение приведено в таблице 1.

Таблица 1

Вещество	Керосин	Эбонит	Кварц	Стекло	Спирт этиловый	Вода (чистая)	Сегнетова соль
ϵ	2,1	2,7–2,9	4,5	5–10	27	81	10 000

1.3. Напряженность электрического поля

Количественной характеристикой силового действия электрического поля на заряженные частицы и тела служит векторная величина \mathbf{E} – напряженность электрического поля.

Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на электрический заряд. Можно утверждать, что мы знаем о поле все, если будем знать силу, действующую на любой заряд в любой точке поля. Поэтому надо ввести такую характеристику поля, знание которой позволит определить эту силу.

Опыт показывает, что сила \mathbf{F} , действующая на неподвижный точечный пробный заряд q_0 , всегда может быть представлена как

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{E}, \quad (1.10)$$

где вектор \mathbf{E} называют *напряженностью* электрического поля в данной точке. Это означает, что напряженность поля зависит от координат: $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z)$. В случае переменных полей она зависит еще от времени.

Вектор \mathbf{E} , как видно из (1.10), можно определить как силу, действующую на единичный положительный неподвижный заряд. Здесь предполагается, что пробный заряд q_0 должен быть достаточно малым, чтобы его внесение не вызвало заметного искажения интересующего нас поля (вследствие возможного перераспределения создающих поле зарядов).

Если $q > 0$, то векторы \mathbf{E} и \mathbf{F} направлены в одну и ту же сторону; при $q < 0$ эти векторы направлены в противоположные стороны (рисунок 1.2). Направление вектора \mathbf{E} не зависит от знака заряда q . Оно совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

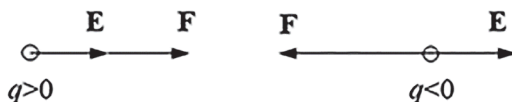


Рисунок 1.2

Поле точечного заряда. Из опыта (закон Кулона) непосредственно следует, что напряженность поля неподвижного точечного заряда q на расстоянии r от него можно представить как

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r, \quad (1.11)$$

где \mathbf{e}_r – орт радиуса-вектора \mathbf{r} , проведенного из центра поля, в котором расположен заряд q , до интересующей нас точки. Здесь коэффициент

$$1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф},$$

заряд q определяют в *кулонах* (Кл), напряженность поля \mathbf{E} – в *вольтах на метр* (В/м). В зависимости от знака заряда q вектор \mathbf{E} направлен так же, как и \mathbf{r} , или противоположно ему.

По существу формула (1.11) выражает не что иное, как *закон Кулона*, но в «полевой» форме. Весьма важно, что напряженность \mathbf{E} поля точечного заряда обратно пропорциональна квадрату расстояния \mathbf{r} . Вся совокупность экспериментальных фактов показывает, что этот закон справедлив для расстояний от 10^{-13} см до нескольких километров, и пока нет никаких оснований ожидать, что этот закон не выполняется и при больших расстояниях.

Заметим еще, что в поле, создаваемом неподвижным точечным зарядом, сила, действующая на пробный заряд, не зависит от того, покоится пробный заряд или движется. Это относится и к системе неподвижных зарядов.

Принцип суперпозиции. Другой опытный факт, кроме закона (1.11), заключается в том, что напряженность поля системы точечных неподвижных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавали бы каждый из зарядов в отдельности:

$$\mathbf{E} = \sum \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_{ri}, \quad (1.12)$$

где r_i – расстояние между зарядом q_i и интересующей нас точкой поля.

Это утверждение называют *принципом суперпозиции* (наложения) электрических полей. Он выражает одно из самых замечательных свойств полей и позволяет вычислять напряженность поля любой системы зарядов, представив ее в виде совокупности точечных зарядов, вклад каждого из которых дается формулой (1.11).

Распределение зарядов. Для упрощения математических расчетов во многих случаях бывает удобно игнорировать тот факт, что заряды имеют дискретную структуру (электроны, ядра), и считать, что они «размазаны» определен-

ным образом в пространстве. Другими словами, удобно заменить истинное распределение точечных дискретных зарядов фиктивным непрерывным распределением. Это позволяет значительно упрощать расчеты, не внося сколько-нибудь значительной ошибки.

При переходе к непрерывному распределению вводят понятие о плотности зарядов – объемной ρ , поверхностной σ и линейной τ в соответствии с выражениями (1.5)–(1.7).

С учетом этих распределений формула (1.12) может быть представлена в другой форме. Например, если заряд распределен по объему, то надо заменить q_i на $dq = \rho dV$ и \sum на \int , тогда

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho \mathbf{e}_r}{r^2} dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho \mathbf{r}}{r^3} dV, \quad (1.13)$$

где интегрирование проводится по всему пространству, в котором ρ отлично от нуля.

Таким образом, зная распределение зарядов, мы можем полностью решить задачу о нахождении напряженности электрического поля по формуле (1.12), если распределение дискретно, или по формуле (1.13) и аналогично ей, если распределение непрерывно. В общем случае расчет сопряжен со значительными трудностями (правда, не принципиального характера). Действительно, для нахождения вектора \mathbf{E} надо вычислить сначала его проекции E_x, E_y, E_z , а это по существу три интеграла типа (1.13). И только в тех случаях, когда система зарядов обладает той или иной симметрией, задача, как правило, значительно облегчается.

Геометрическое описание электрического поля. Зная вектор \mathbf{E} в каждой точке, можно представить электрическое поле очень наглядно с помощью линий напряженности, или линий вектора \mathbf{E} (рисунок 1.3, *а*). Эти линии проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с направлением вектора \mathbf{E} , а густота линий, т.е. число линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную линиям в данной точке, была бы пропорциональна модулю вектора \mathbf{E} . Кроме того, этим линиям приписывают направление, совпадающее с направлением вектора \mathbf{E} . Силовые линии поля положительного точечного заряда представлено на рисунке 1.3, *б*, а разноименных и одноименных зарядов на рисунке 1.3, *в*. По полученной картине можно легко судить о конфигурации данного электрического поля – о направлении и модуле вектора \mathbf{E} в разных точках поля.

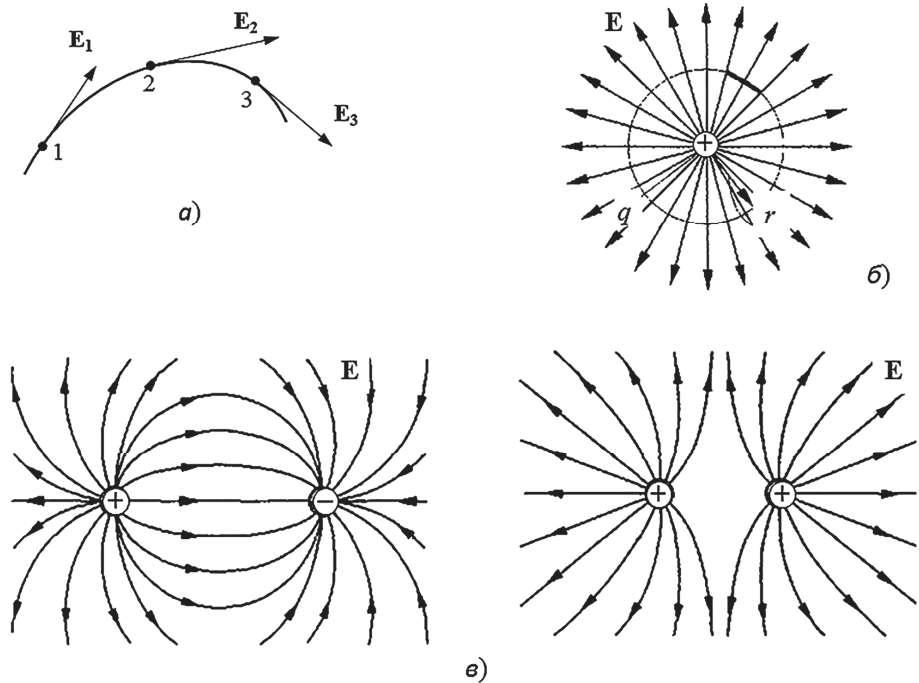


Рисунок 1.3

Об общих свойствах поля E . Определенное выше поле E обладает, как выяснилось, двумя чрезвычайно важными свойствами, знание которых помогло глубже проникнуть в суть самого понятия поля и сформулировать его законы, а также открыло возможность решить ряд вопросов весьма просто и изящно. Эти свойства, – так называемые теорема Гаусса и теорема о циркуляции вектора E , связаны с двумя важнейшими математическими характеристиками всех векторных полей: *поток* и *циркуляцией*. Как мы увидим, пользуясь только этими двумя понятиями, можно описать все законы не только электричества, но и магнетизма. Перейдем к последовательному рассмотрению этих свойств.

1.4. Теорема Гаусса

Поток вектора E . Для большей наглядности воспользуемся геометрической картиной описания электрического поля (с помощью линий вектора E).

Для упрощения рассуждений, будем считать, что густота линий \mathbf{E} равна модулю вектора \mathbf{E} . Тогда число линий, пронизывающих элементарную площадку dS , нормаль \mathbf{n} которой составляет угол α с вектором \mathbf{E} , определяется согласно рисунка 1.4 как $E dS \cos \alpha = E_n dS$. Эта величина и есть поток $d\Phi$ вектора \mathbf{E} сквозь площадку dS . В более компактной форме

$$d\Phi = E_n dS = \mathbf{E} d\mathbf{S}, \quad (1.14)$$

где E_n – проекция вектора \mathbf{E} на нормаль \mathbf{n} к площадке dS ;
 $d\mathbf{S}$ – вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с нормалью \mathbf{n} к площадке. Заметим, что выбор направления вектора \mathbf{n} (а, следовательно, и $d\mathbf{S}$) условен, его можно было бы направить и в противоположную сторону.

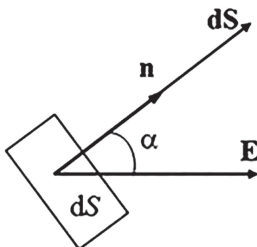


Рисунок 1.4

Если имеется некоторая произвольная поверхность S , то поток вектора \mathbf{E} сквозь нее

$$\Phi = \int_S \mathbf{E} d\mathbf{S}. \quad (1.15)$$

Эта величина алгебраическая: она зависит не только от конфигурации поля \mathbf{E} , но и от выбора направления нормали. В случае *замкнутых* поверхностей принято нормаль \mathbf{n} брать *наружу* области, охватываемой этими поверхностями, т.е. выбирать *внешнюю* нормаль.

Хотя здесь речь шла о потоке вектора \mathbf{E} , понятие потока равной степени относится к любому векторному полю.

Теорема Гаусса. Поток вектора \mathbf{E} сквозь произвольную замкнутую поверхность S обладает удивительным и замечательным свойством: он зависит