

Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Физика

Часть 3

Основы электростатики и магнитостатики

Учебное пособие

Под редакцией А.Н. Морозова



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана

2026

УДК 537.8
ББК 22.33
В31

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/8580/>

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рецензент
д-р физ.-мат. наук *С.М. Коротаев*

Веретимус, Д. К.

В31 Физика. Часть 3: Основы электростатики и магнитостатики : учебное пособие / Д. К. Веретимус, Н. К. Веретимус ; под ред. А. Н. Морозова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 204, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6718-1

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана основ электростатики и магнитостатики в рамках изучения дисциплины «Физика». Даны основные понятия и определения. Рассмотрены примеры решения задач. Приведены задачи для самостоятельного решения, а также контрольные вопросы для проверки знаний по изученным темам.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Физика».

УДК 537.8
ББК 22.33



Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6718-1

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Предисловие

Курс физики в техническом вузе является ключевым, так как он демонстрирует всю сложность и разнообразие окружающего мира. Впоследствии студенты будут изучать специальные дисциплины, такие как теоретическая механика, гидравлика, теплотехника, электротехника и т. д., но эти дисциплины не будут рассматриваться во взаимосвязи, как в курсе физики.

Данное учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов и дает полный обзор курса лекций и практических занятий модуля 4 рабочей программы дисциплины по всем направлениям подготовки трехсеместрового курса «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана для специалитета и двухсеместрового — для бакалавриата.

Цель издания — приобретение теоретических знаний и практических навыков в области расчета электростатических и магнитостатических полей, движения частицы при различном совместном действии этих полей. После изучения материала студенты смогут: определять поля различными способами, как теоретически, так и экспериментально; определять траекторию частицы в зависимости от действующих полей.

Для изучения дисциплины «Физика» необходимо предварительное освоение таких учебных дисциплин, как математический анализ (интегралы, дифференциальные уравнения, линейная алгебра и функции многих переменных), химия, информатика.

В учебном пособии рассмотрены следующие разделы: электрическое поле, системы неподвижных зарядов в вакууме, теоремы Гаусса и о циркуляции для электростатического и магнитостатического полей, работа и потенциал электростатического поля, электростатическое поле в диэлектрике, электрическое поле заряженных проводников, энергия электростатического поля, электрический ток, магнитное поле в вакууме и веществе, движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, проводники с током в магнитном поле, электромагнитная индукция.

Материалы, приведенные в пособии, адаптированы для студенческой аудитории. Авторами подробно рассмотрены решения примеров в тексте глав и задачи, приведенные в конце каждой главы, которые позволяют более глубоко усвоить теоретические основы предмета.

Условия в примерах решения задач и задачи для самостоятельного решения взяты из задачника И.Е. Иродова*.

Авторы выражают огромную благодарность за участие в обсуждении текста данного пособия доцентам кафедры «Физика» Д.В. Креопалову, В.Г. Голубеву и А.В. Козыреву.

* *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. 431 с.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ НЕПОДВИЖНЫХ ЗАРЯДОВ В ВАКУУМЕ. ТЕОРЕМА ГАУССА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВАКУУМЕ

1.1. Электрический заряд

Электрический заряд q — одна из фундаментальных характеристик элементарных частиц, заряды которых могут быть $q = 0$, $q = +e$, $q = -e$ ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный электрический заряд). В СИ единица заряда — кулон (Кл).

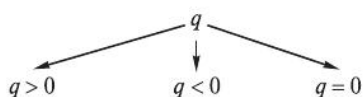


Рис. 1.1. Заряды физических тел

В природе физические тела могут иметь положительный заряд ($q > 0$), отрицательный ($q < 0$) и быть электрически нейтральными ($q = 0$) (рис. 1.1). Процесс электризации тел рассматривают с использованием *микроскопической* или *макроскопической* теории (рис. 1.2).

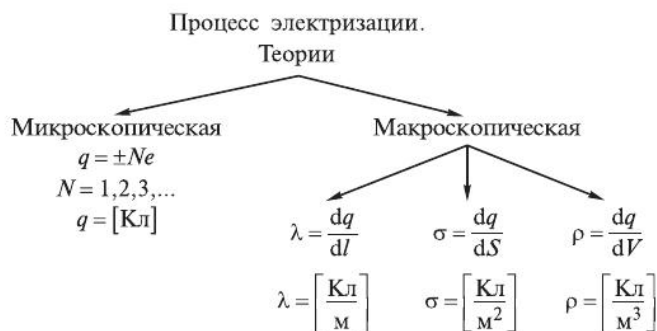


Рис. 1.2. Процесс электризации. Теории

Микроскопическая теория учитывает дискретность электрического заряда и считает, что заряд любого заряженного тела кратен элементарному заряду $q = \pm Ne$, $N = 1, 2, 3, \dots$

Макроскопическая теория электромагнитных явлений рассматривает тела, состоящие из огромного числа атомов. В ней дискретностью электрических зарядов тел можно пренебречь и считать, что электрический заряд непрерывно распределен по заряженному телу. Выделяют следующие распределения электрического заряда:

1) по линии (нити) — характеризует *линейная плотность* электрического заряда. Распределение электрического заряда по нити приведено на рис. 1.3, где M — точка окрестности, в которой определяется плотность заряда — линейная, поверхностная или объемная. Линейная плотность заряда

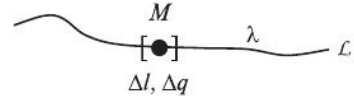


Рис. 1.3. Распределение электрического заряда по нити

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta l} \right) = \frac{dq}{dl}, \quad (1.1)$$

где dl — элементарная длина. В СИ единица линейной плотности заряда λ — кулон на метр (Кл/м).

2) по поверхности — *поверхностная плотность* электрического заряда (рис. 1.4)

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta S} \right) = \frac{dq}{dS}, \quad (1.2)$$

где dS — элементарная площадь. В СИ единица поверхностной плотности заряда σ — кулон на метр в квадрате (Кл/м²).

3) в объеме тела — *объемная плотность* электрического заряда (рис. 1.5)

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta V} \right) = \frac{dq}{dV}, \quad (1.3)$$

где dV — элементарный объем. В СИ единица объемной плотности заряда ρ — кулон на метр в кубе (Кл/м³).

Точечный электрический заряд — заряд, помещенный на теле, размерами и формой которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

Закон сохранения электрического заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов (полный заряд) в электрически изолированной системе всегда сохраняется, т. е. не изменяется во времени.

Электрически изолированная система — система заряженных тел, находящихся в некотором объеме пространства, ограниченном замкнутой поверхностью, которую не пересекают заряженные частицы.

Закону сохранения электрического заряда в электрически изолированной системе не противоречат процессы рождения или исчезновения заряженных частиц, если их суммарный заряд равен нулю, например, процесс аннигиляции электрона ($-e$) и позитрона ($+e$).

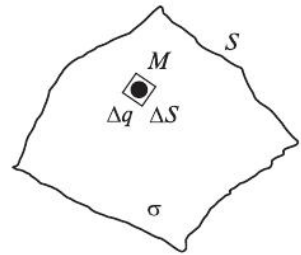


Рис. 1.4. Распределение электрического заряда по поверхности S

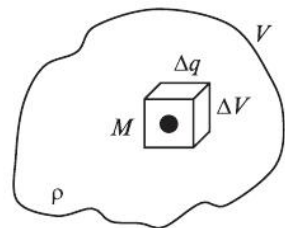


Рис. 1.5. Распределение электрического заряда в объеме тела V

1.2. Закон Кулона

Закон Кулона: сила, с которой взаимодействуют в вакууме два неподвижных точечных заряда, прямо пропорциональна величинам зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Сила взаимодействия направлена вдоль линии, соединяющей заряды,

$$\vec{F}_2 = k_0 \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}, \quad (1.4)$$

где $\vec{F}_2$ — сила, действующая на второй точечный заряд, $\vec{e}_{12} = \vec{r}_{12}/r_{12}$ — единичный вектор, направленный от заряда q_1 к заряду q_2 , r_{12} — расстояние между этими зарядами. В СИ

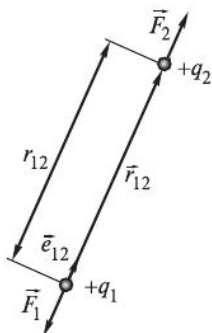


Рис. 1.6. Силы взаимодействия двух одноименных точечных зарядов

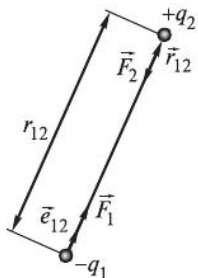


Рис. 1.7. Силы взаимодействия двух разноименных точечных зарядов

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} = 9 \cdot 10^9 \Phi^{-1} \cdot \text{м},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м}$, измеряется в фарадах на метр ($\Phi/\text{м}$). Фарад — единица электрической емкости в СИ.

Одноименные заряды ($q_1 q_2 > 0$) отталкиваются $\vec{F}_2 \uparrow \vec{e}_{12}$ (рис. 1.6). Разноименные электрические заряды ($q_1 q_2 < 0$) притягиваются, направления сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ изменятся на противоположные (рис. 1.7).

Зная закон электрического взаимодействия точечных зарядов, можно рассчитать силу взаимодействия между двумя телами любой формы и размеров, заряженных в общем случае по объему.

Электрическое поле является материальным носителем электрического взаимодействия заряженных тел. В теории поля считается, что первое тело создает в окружающем пространстве электрическое поле, и это поле действует на второе заряженное тело. Соответственно второе заряженное тело порождает поле, которое действует на первое тело.

Электрическое поле создается в окружающем пространстве любым заряженным телом, причем каждое конкретное заряженное тело порождает в пространстве свое, индивидуальное по структуре и свойствам электрическое поле. Расчет полей — главная задача теории электрического поля.

1.3. Напряженность электростатического поля

Убедиться в том, что в любой точке $M=M(x, y, z)$ пространства вокруг заряженного тела существует электрическое поле можно, поместив в точку M пробный электрический заряд $q_{\text{пр}}$. **Пробный заряд** — точечный, положительный и достаточно малый по величине, такой, чтобы при помещении его в точку M пространства он не влиял на распределение зарядов в теле, создающем электрическое поле.

На пробный заряд будет действовать со стороны поля сила $\vec{F}$, характеризующая электрическое поле в этой точке. **Напряженность** электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} \quad (1.5)$$

— силовая характеристика поля в точке M (рис. 1.8). Описать электрическое поле — значит задать в каждой точке пространства напряженность $\vec{E}$ этого поля.

Напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на единичный точечный заряд, помещенный в данную точку поля. Направление $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на пробный заряд. В СИ единица напряженности $|\vec{E}|$ — вольт на метр (В/м) определяется через единицу потенциала — вольт (В).

В произвольном электрическом поле

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (1.6)$$

где $\vec{F}$ — сила, действующая на любой точечный заряд q , помещенный в точку пространства с напряженностью поля $\vec{E}$.

В общем случае напряженность электрического поля зависит и от пространственных координат, и от времени:

$$\vec{E} = \vec{E}(x, y, z, t).$$

Электростатическое поле создается системой неподвижных электрических зарядов (заряженных тел), заряд которых во времени не изменяется.

Электростатическое поле — частный случай электрического поля. *Свойства изменяющегося во времени электрического поля существенно отличаются от свойств электростатического поля.*

Определим силовую характеристику электростатического поля точечного заряда q , расположенного в начале O некоторой системы координат. Для этого поместим в точку M пространства, заданную радиус-вектором $\vec{r}$, пробный заряд $q_{\text{пр}}$.

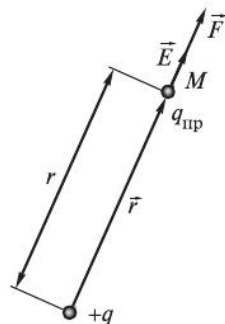


Рис. 1.8. Напряженность поля точечного положительного заряда в точке M

Оглавление

Предисловие	3
1. Электрическое поле системы неподвижных зарядов в вакууме.	
Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме	4
1.1. Электрический заряд	4
1.2. Закон Кулона	6
1.3. Напряженность электростатического поля	7
1.4. Силовые линии	8
1.5. Принцип суперпозиции и его применение к расчету поля системы неподвижных зарядов	10
1.6. Поток вектора напряженности электрического поля	14
1.7. Теорема Гаусса в интегральной и дифференциальной формах в вакууме и ее применение для расчета электрических полей	16
1.8. Расчет электрических полей с помощью теоремы Гаусса	17
Примеры решения задач	22
Задачи для самостоятельного решения	31
Контрольные вопросы и задания	32
2. Работа и потенциал электростатического поля	33
2.1. Работа электростатического поля при перемещении зарядов	33
2.2. Потенциал электрического поля	34
2.3. Потенциал поля системы точечных зарядов	35
2.4. Циркуляция вектора напряженности	36
2.5. Связь вектора напряженности и потенциала	36
2.6. Определение разности потенциалов по заданному полю вектора напряженности	37
2.7. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии поля	38
2.8. Уравнение Пуассона	39
2.9. Теорема единственности	39
Примеры решения задач	39
Задачи для самостоятельного решения	43
Контрольные вопросы и задания	43
3. Электростатическое поле в диэлектрике	45
3.1. Электрический диполь в электростатическом поле	45
3.2. Диполь в однородном электрическом поле	47
3.3. Диполь в неоднородном электрическом поле	48
3.4. Потенциальная энергия диполя, помещенного в однородное электрическое поле	49
3.5. Поляризация диэлектриков	50
3.6. Поляризованность	51
3.7. Свободные и связанные заряды	51
3.8. Электростатическое поле в диэлектрике	52
3.9. Связь поляризованности с плотностью связанных зарядов	52

3.10. Вектор электрического смещения	53
3.11. Обобщение теоремы Гаусса	54
3.12. Поле на границе раздела диэлектриков	55
Примеры решения задач	59
Задачи для самостоятельного решения	67
Контрольные вопросы и задания	67
4. Электрическое поле заряженных проводников. Энергия электростатического поля	68
4.1. Электрическое поле заряженных проводников	68
4.2. Основные свойства проводников в электростатике	68
4.3. Поле вблизи поверхности проводника	69
4.4. Метод «зеркальных» изображений	70
4.5. Электрическая емкость проводников и конденсаторов	71
4.6. Электрическая емкость конденсатора	73
4.7. Электрические емкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов	73
4.8. Энергия системы неподвижных зарядов	76
4.9. Энергия заряженного проводника и конденсатора	77
4.10. Плотность энергии электростатического поля	78
Примеры решения задач	79
Задачи для самостоятельного решения	87
Контрольные вопросы и задания	88
5. Электрический ток	89
5.1. Носители тока в средах	89
5.2. Сила и плотность тока	89
5.3. Уравнение непрерывности	90
5.4. Электрическое поле в проводнике с током. Сторонние силы	92
5.5. Закон Ома в интегральной и дифференциальной формах	93
5.6. Закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах	96
5.7. Правила Кирхгофа для разветвленных электрических цепей	97
Примеры решения задач	98
Задачи для самостоятельного решения	103
Контрольные вопросы и задания	103
6. Магнитное поле в вакууме	104
6.1. Вектор индукции магнитного поля	104
6.2. Закон Био-Савара	105
6.3. Принцип суперпозиции магнитных полей	106
6.4. Магнитное поле прямого тока	106
6.5. Магнитное поле кругового тока	107
6.6. Теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля в вакууме	108
6.7. Расчет магнитного поля тороида и соленоида	110

Примеры решения задач	112
Задачи для самостоятельного решения	116
Контрольные вопросы и задания	116
7. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	118
7.1. Сила Лоренца	118
7.2. Частные случаи движения заряженной частицы в электрических и магнитных полях	118
7.3. Ускорение заряженных частиц	121
7.4. Движение частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях	123
7.5. Эффект Холла	131
7.6. Преобразования Лоренца для электрических и магнитных полей (без вывода)	132
Примеры решения задач	134
Задачи для самостоятельного решения	138
Контрольные вопросы и задания	138
8. Проводники с током в магнитном поле. Теорема Гаусса для магнитного поля	140
8.1. Закон Ампера	140
8.2. Магнитный момент контура с током	142
8.3. Контур с током в магнитном поле	143
8.4. Поток вектора магнитной индукции	147
8.5. Теорема Гаусса для магнитного поля в интегральной и дифференциальной форме	149
8.6. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле ...	149
8.7. Работа по перемещению контура с током в магнитном поле	150
Примеры решения задач	151
Задачи для самостоятельного решения	153
Контрольные вопросы и задания	154
9. Магнитное поле в веществе	155
9.1. Намагниченность вещества	155
9.2. Теорема о циркуляции векторов напряженности магнитного поля и намагниченности	158
9.3. Вектор напряженности магнитного поля и его связь с векторами индукции и намагниченности. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость	160
9.4. Поле на границе раздела магнетиков	162
9.5. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики	166
Примеры решения задач	170
Задачи для самостоятельного решения	175
Контрольные вопросы и задания	176
10. Электромагнитная индукция	178
10.1. Закон Фарадея. Правило Ленца	178

10.2. Самоиндукция	181
10.3. Взаимная индукция	185
10.4. Вихревые токи	187
10.5. Плотность энергии магнитного поля	189
10.6. Энергия и силы в магнитном поле	191
10.7. Магнитное давление	193
Примеры решения задач	194
Задачи для самостоятельного решения	199
Контрольные вопросы и задания	199
Литература	200