

**М. А. Зеликман**

# **ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ**

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.  
ТОК В СРЕДАХ.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.  
УПРУГИЕ ВОЛНЫ.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

**М. А. Зеликман**

# **Физика для инженеров**

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.  
ТОК В СРЕДАХ.  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.  
УПРУГИЕ ВОЛНЫ.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2025

УДК 531:536:532.5.013

ББК 22.3

3-49

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *В. К. Иванов*;  
доктор педагогических наук и кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена *И. И. Хинич*

**Зеликман, М. А.**

**3-49** Физика для инженеров. Электромагнетизм. Ток в средах. Электрические колебания. Упругие волны. Электромагнитные волны : учебное пособие / М. А. Зеликман. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 136 с. : ил.

ISBN 978-5-9729-2482-0

Изложены основные теоретические понятия и формулы курса общей физики для технических вузов по темам «Электромагнетизм», «Ток в средах», «Электрические колебания», «Упругие волны», «Электромагнитные волны». Большое внимание уделено физическому смыслу изучаемых явлений, рассматриваются примеры типичных задач. Особое внимание автор обращает на некоторые тонкие моменты, выделяя их в примечаниях. Также в пособии размещены некоторые систематические напоминания сведений из средней школы, чтобы у читателя не возникала необходимость обращаться к школьным учебникам.

Для студентов младших курсов технических и физических направлений, а также для людей, интересующихся физикой и желающих устранить пробелы в своих знаниях.

УДК 531:536:532.5.013

ББК 22.3

ISBN 978-5-9729-2482-0

© Зеликман М. А., 2025

© СПбПУ, 2025

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ</b> .....                                     | 3  |
| <b>ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b> .....                              | 3  |
| §1.1. Электростатическое поле в вакууме. Основные факты .....     | 3  |
| §1.2. Электростатическое поле. Напряженность поля .....           | 4  |
| §1.3. Потенциал .....                                             | 5  |
| §1.4. Электрическая энергия системы зарядов .....                 | 6  |
| §1.5. Связь между напряженностью и потенциалом .....              | 8  |
| §1.6. Диполь .....                                                | 9  |
| §1.7. Поле системы зарядов на больших расстояниях .....           | 11 |
| <b>ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА</b> .....                 | 13 |
| §2.1. Градиент .....                                              | 13 |
| §2.2. Поток вектора .....                                         | 15 |
| §2.3. Дивергенция .....                                           | 16 |
| §2.4. Теорема Остроградского – Гаусса .....                       | 17 |
| §2.5. Циркуляция и ротор .....                                    | 17 |
| §2.6. Теорема Стокса .....                                        | 18 |
| §2.7. Оператор набла .....                                        | 19 |
| §2.8. Циркуляция и ротор электростатического поля .....           | 20 |
| §2.9. Теорема Гаусса и дивергенция электростатического поля ..... | 20 |
| §2.10. Уравнение Пуассона .....                                   | 21 |
| §2.11. Электростатическое поле металлической сетки .....          | 22 |
| §2.12. Вычисление полей с помощью теоремы Гаусса .....            | 23 |
| <b>ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКАХ</b> .....           | 25 |
| §3.1. Полярные и неполярные молекулы .....                        | 25 |
| §3.2. Поляризация диэлектрика .....                               | 25 |
| §3.3. Поле внутри диэлектрика .....                               | 26 |
| §3.4. Объемные и поверхностные связанные заряды .....             | 26 |
| §3.5. Вектор электрического смещения .....                        | 27 |
| §3.6. Поле внутри плоской диэлектрической пластины .....          | 28 |
| §3.7. Условия на границе двух диэлектриков .....                  | 29 |
| §3.8. Сегнетоэлектрики .....                                      | 30 |
| <b>ГЛАВА 4. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ</b> .....             | 31 |
| §4.1. Электрическое поле в проводниках .....                      | 31 |
| §4.2. Напряженность поля у поверхности проводника .....           | 31 |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| §4.3. Потенциал уединенного проводящего шара .....                     | 32        |
| §4.4. Метод зеркального отражения .....                                | 33        |
| §4.5. Метод зеркального отражения в случае шара .....                  | 33        |
| §4.6. Емкость уединенного проводника .....                             | 35        |
| §4.7. Конденсаторы .....                                               | 36        |
| §4.8. Энергия электрического поля .....                                | 37        |
| <b>ГЛАВА 5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК .....</b>                     | <b>39</b> |
| §5.1. Электрический ток .....                                          | 39        |
| §5.2. Уравнение непрерывности .....                                    | 39        |
| §5.3. Электродвижущая сила (ЭДС) .....                                 | 40        |
| §5.4. Закон Ома. Сопротивление .....                                   | 41        |
| §5.5. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа .....                       | 41        |
| §5.6. Метод контурных токов .....                                      | 42        |
| §5.7. Мощность тока. Закон Джоуля – Ленца .....                        | 43        |
| §5.8. Напряжение на зажимах источника тока .....                       | 44        |
| <b>ГЛАВА 6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ .....</b>                         | <b>45</b> |
| §6.1. Магнитное поле. Основные факты .....                             | 45        |
| §6.2. Вектор магнитной индукции .....                                  | 45        |
| §6.3. Закон Био – Савара – Лапласа .....                               | 46        |
| §6.4. Поле прямолинейного тока .....                                   | 46        |
| §6.5. Линии магнитной индукции и их свойства .....                     | 47        |
| §6.6. Принцип суперпозиции .....                                       | 47        |
| §6.7. Поле движущегося заряда .....                                    | 48        |
| §6.8. Закон Ампера .....                                               | 49        |
| §6.9. Сила Лоренца .....                                               | 49        |
| §6.10. Контур с током в магнитном поле .....                           | 51        |
| §6.11. Энергия контура с током в магнитном поле .....                  | 53        |
| §6.12. Магнитное поле кругового контура с током .....                  | 53        |
| §6.13. Примеры анализа магнитных взаимодействий .....                  | 54        |
| §6.14. Работа, совершаемая при перемещении тока в магнитном поле ..... | 56        |
| §6.15. Дивергенция и ротор магнитного поля .....                       | 57        |
| §6.16. Поле внутри соленоида .....                                     | 58        |
| §6.17. Векторный потенциал магнитного поля .....                       | 60        |
| <b>ГЛАВА 7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ .....</b>                        | <b>62</b> |
| §7.1. Намагничивание магнетика .....                                   | 62        |
| §7.2. Напряженность магнитного поля .....                              | 63        |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| §7.3. Теорема о циркуляции напряженности магнитного поля .....              | 64        |
| §7.4. Вычисление поля в магнетике .....                                     | 65        |
| §7.5. Условия на границе двух магнетиков .....                              | 66        |
| §7.6. Виды магнетиков.....                                                  | 67        |
| <b>ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ .....</b>                             | <b>70</b> |
| §8.1. Явление электромагнитной индукции .....                               | 70        |
| §8.2. ЭДС индукции .....                                                    | 70        |
| §8.3. Примеры анализа явления электромагнитной индукции .....               | 72        |
| §8.4. Явление самоиндукции.....                                             | 74        |
| §8.5. Ток при замыкании и размыкании контура.....                           | 75        |
| §8.6. Взаимная индукция .....                                               | 76        |
| §8.7. Энергия магнитного поля.....                                          | 76        |
| <b>ГЛАВА 9. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.....</b>                                    | <b>78</b> |
| §9.1. Вихревое электрическое поле .....                                     | 78        |
| §9.2. Ток смещения .....                                                    | 79        |
| §9.3. Уравнения Максвелла.....                                              | 81        |
| <b>ТОК В СРЕДАХ .....</b>                                                   | <b>82</b> |
| <b>ГЛАВА 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ</b>                               |           |
| <b>И ПОЛУПРОВОДНИКАХ .....</b>                                              | <b>82</b> |
| §10.1. Природа носителей тока в металлах .....                              | 82        |
| §10.2. Элементарная классическая теория металлов.....                       | 83        |
| §10.3. Зонная структура твердых тел .....                                   | 85        |
| §10.4. Примесные полупроводники .....                                       | 87        |
| §10.5. Эффект Холла.....                                                    | 89        |
| §10.6. Работа выхода электрона из металла. Виды электронной<br>эмиссии..... | 90        |
| §10.7. Контактная разность потенциалов .....                                | 91        |
| §10.8. Термоэлектрические явления.....                                      | 92        |
| <b>ГЛАВА 11. ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ И В ГАЗАХ .....</b>                         | <b>96</b> |
| §11.1. Электролиз .....                                                     | 96        |
| §11.2. Законы Фарадея .....                                                 | 98        |
| §11.3. Электропроводность газов .....                                       | 98        |
| §11.4. Виды самостоятельного газового разряда .....                         | 100       |
| §11.5. Электрические явления в атмосфере .....                              | 101       |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b> .....                                        | 105 |
| <b>ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ</b> .....                        | 105 |
| §12.1. Свободные незатухающие колебания в колебательном контуре ..... | 105 |
| §12.2. Свободные затухающие колебания .....                           | 106 |
| §12.3. Вынужденные электрические колебания. Резонанс .....            | 107 |
| §12.4. Переменный ток .....                                           | 109 |
| <b>ГЛАВА 13. УПРУГИЕ ВОЛНЫ</b> .....                                  | 113 |
| §13.1. Распространение волн в упругой среде .....                     | 113 |
| §13.2. Уравнения плоской и сферической волн .....                     | 114 |
| §13.3. Звук .....                                                     | 116 |
| §13.4. Волновое уравнение .....                                       | 116 |
| §13.5. Решения волнового уравнения .....                              | 118 |
| §13.6. Стоячие волны .....                                            | 119 |
| §13.7. Колебание струны .....                                         | 120 |
| §13.8. Эффект Доплера для звуковых волн .....                         | 121 |
| <b>ГЛАВА 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ</b> .....                         | 123 |
| §14.1. Волновое уравнение для электромагнитных волн .....             | 123 |
| §14.2. Плоская электромагнитная волна .....                           | 124 |
| §14.3. Экспериментальное исследование электромагнитных волн .....     | 126 |
| §14.4. Энергия и импульс электромагнитных волн .....                  | 127 |
| §14.5. Излучение движущегося заряда .....                             | 128 |
| §14.6. Эффект Доплера для электромагнитных волн .....                 | 129 |