

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

К89

**Кузнецов С.И.**

К89 Курс физики с примерами решения задач: учебное пособие. Ч. II. Электричество и магнетизм. Колебания и волны / С.И. Кузнецов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 350 с.

ISBN 978-5-4387-0301-3 (ч. 2)

ISBN 978-5-4387-0299-3

В пособии рассмотрены свойства материи, связанные с наличием в природе электрических зарядов, которые определяют возникновение электромагнитных полей. Даны разъяснения основных законов, явлений и понятий электромагнетизма. Рассмотрены законы, связанные с механическими и электромагнитными колебаниями и распространением волн. Раскрыты принципы теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных волн и связь между оптическими и электромагнитными явлениями.

Цель пособия – помочь студентам освоить материал программы, научить активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи, связанные с повышением ресурсоэффективности. Пособие ориентировано на организацию самостоятельной работы студентов. В нем анализируется решение многих физических задач, приводятся задачи для самостоятельного решения и ответы к ним.

Предназначено для межвузовского использования преподавателями и студентами технических специальностей очной и дистанционной форм обучения.

**УДК 53(075.8)**

**ББК 22.3я73**

### *Рецензенты*

Доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий кафедрой теоретической физики ТГУ

*А.В. Шаповалов*

Доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры теоретической физики ТГПУ

*Ю.П. Кунашенко*

ISBN 978-5-4387-0301-3 (ч. 2)

ISBN 978-5-4387-0299-3

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Кузнецов С.И., 2013

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>8</b>
<b>КАК ПОЛЬЗОВАТЬСЯ КНИГОЙ .....</b>	<b>10</b>
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ.....</b>	<b>12</b>
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>13</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Электростатическое поле в вакууме .....</b>	<b>16</b>
1.1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда .....	16
1.1.2. Взаимодействие электрических зарядов в вакууме. Закон Кулона .....	16
1.1.3. Электростатическое поле. Напряженность поля .....	17
1.1.4. Сложение электростатических полей. Принцип суперпозиции .....	18
1.1.5. Электростатическое поле диполя .....	19
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. Теорема Остроградского–Гаусса .....</b>	<b>21</b>
1.2.1. Силовые линии электростатического поля .....	21
1.2.2. Поток вектора напряженности .....	23
1.2.3. Теорема Остроградского–Гаусса .....	24
1.2.4. Дифференциальная форма теоремы Остроградского–Гаусса .....	26
1.2.5. Вычисление электрических полей с помощью теоремы Остроградского–Гаусса .....	28
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>33</b>
<b>1.3. Потенциальная энергия и работа электростатического поля.         Связь напряженности с потенциалом.....</b>	<b>34</b>
1.3.1. Работа сил электростатического поля .....	34
1.3.2. Потенциальная энергия.....	36
1.3.3. Потенциал. Разность потенциалов.....	37
1.3.4. Связь между напряженностью и потенциалом .....	39
1.3.5. Безвихревой характер электростатического поля .....	40
1.3.6. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности .....	41
1.3.7. Расчет потенциалов простейших электростатических полей.....	42
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>46</b>
<b>1.4. Диэлектрики в электростатическом поле .....</b>	<b>47</b>
1.4.1. Поляризация диэлектриков .....	47
1.4.2. Различные виды диэлектриков .....	51
1.4.3. Вектор электрического смещения $\vec{D}$ .....	54

1.4.4. Поток вектора электрического смещения. Теорема Остроградского–Гаусса для $\vec{D}$ .....	56
1.4.5. Изменение $\vec{E}$ и $\vec{D}$ на границе раздела двух диэлектриков .....	57
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>58</b>
<b>1.5. Проводники в электростатическом поле.....</b>	<b>59</b>
1.5.1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике .....	59
1.5.2. Определение напряженности поля вблизи поверхности заряженного проводника .....	61
1.5.3. Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике .....	62
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>64</b>
<b>1.6. Конденсаторы .....</b>	<b>65</b>
1.6.1. Электрическая емкость.....	65
1.6.2. Соединение конденсаторов.....	67
1.6.3. Расчет емкостей различных конденсаторов.....	68
1.6.4. Энергия электростатического поля.....	71
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>73</b>
<b>1.7. Постоянный электрический ток.....</b>	<b>75</b>
1.7.1. Характеристики электрического тока.....	75
1.7.2. Уравнение непрерывности.....	77
1.7.3. Сторонние силы и ЭДС.....	77
1.7.4. Закон Ома для неоднородного участка цепи .....	78
1.7.5. Закон Ома в дифференциальной форме .....	79
1.7.6. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца .....	80
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>83</b>
<b>1.8. Электрический ток в металлах, полупроводниках и в электролитах .....</b>	<b>84</b>
1.8.1. Электрический ток в металлах .....	84
1.8.2. Электрический ток в полупроводниках .....	89
1.8.3. Сверхпроводимость .....	94
1.8.4. Эмиссия электронов из проводников .....	95
1.8.5. Контактные явления на границе раздела двух проводников.....	101
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>107</b>
<b>1.9. Электрический ток в газах.....</b>	<b>108</b>
1.9.1. Явление ионизации и рекомбинации в газах .....	108
1.9.2. Несамостоятельный газовый разряд.....	110
1.9.3. Самостоятельный газовый разряд.....	113
1.9.4. Типы разрядов.....	115
1.9.5. Применение газового разряда .....	119
1.9.6. Понятие о плазме .....	120

Вопросы к читателю. Упражнения.....	123
Примеры решения задач.....	124
Задачи для самостоятельного решения .....	140
<b>2. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....</b>	<b>143</b>
<b>2.1. Магнитное поле.....</b>	<b>143</b>
2.1.1. Магнитные взаимодействия .....	143
2.1.2. Закон Био–Савара–Лапласа .....	145
2.1.3. Магнитное поле движущегося заряда .....	146
2.1.4. Напряженность магнитного поля.....	147
2.1.5. Магнитное поле прямого тока .....	148
2.1.6. Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции .....	149
Вопросы к читателю. Упражнения.....	150
<b>2.2. Силы, действующие на движущиеся заряды</b>	
<b>в магнитном поле.....</b>	<b>151</b>
2.2.1. Закон Ампера .....	151
2.2.2. Взаимодействие двух параллельных проводников с током.....	151
2.2.3. Воздействие магнитного поля на рамку с током.....	152
2.2.4. Единицы измерения магнитных величин.....	154
2.2.5. Сила Лоренца .....	155
Вопросы к читателю. Упражнения.....	156
<b>2.3. Циркуляция вектора магнитной индукции .....</b>	<b>157</b>
2.3.1. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции .....	157
2.3.2. Магнитное поле соленоида .....	159
2.3.3. Магнитное поле тороида .....	162
2.3.4. Работа по перемещению проводника с током	
в магнитном поле.....	163
Вопросы к читателю. Упражнения.....	167
<b>2.4. Явление электромагнитной индукции.....</b>	<b>167</b>
2.4.1. Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца .....	167
2.4.2. Величина ЭДС индукции .....	169
2.4.3. Природа ЭДС индукции .....	171
2.4.4. Циркуляция вектора напряженности вихревого	
электрического поля .....	173
2.4.5. Токи Фуко (вихревые токи) .....	174
2.4.6. Скин-эффект .....	175
Вопросы к читателю. Упражнения.....	177
<b>2.5. Ускорители заряженных частиц .....</b>	<b>178</b>
2.5.1. Классификация ускорителей .....	178
2.5.2. Линейные ускорители .....	178
2.5.3. Циклические ускорители .....	179
2.5.4. Большой адронный коллайдер.....	185
Вопросы к читателю. Упражнения.....	187

<b>2.6. Самоиндукция и взаимная индукция.....</b>	<b>188</b>
2.6.1. Явление самоиндукции .....	188
2.6.2. Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность .....	189
2.6.3. Взаимная индукция.....	191
2.6.4. Индуктивность трансформатора .....	192
2.6.5. Энергия магнитного поля .....	193
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>196</b>
<b>2.7. Магнитные свойства вещества.....</b>	<b>197</b>
2.7.1. Магнитные моменты электронов и атомов.....	197
2.7.2. Атом в магнитном поле.....	200
2.7.3. Магнитное поле в веществе.....	201
2.7.4. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле .....	204
2.7.5. Ферромагнетики .....	205
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>210</b>
<b>2.8. Уравнения Максвелла .....</b>	<b>210</b>
2.8.1. Закон полного тока.....	210
2.8.2. Ток смещения.....	211
2.8.3. Единая теория электрических и магнитных явлений. Система уравнений Максвелла.....	213
2.8.4. Пояснение к теории классической электродинамики .....	217
2.8.5. Скорость распространения ЭМП.....	217
2.8.6. Релятивистская трактовка магнитных явлений (общие положения) .....	219
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>220</b>
<b>Примеры решения задач.....</b>	<b>221</b>
<b>Задачи для самостоятельного решения .....</b>	<b>235</b>
<b>3. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ .....</b>	<b>239</b>
<b>3.1. Гармонические колебания.....</b>	<b>239</b>
3.1.1. Виды и признаки колебаний .....	239
3.1.2. Параметры гармонических колебаний .....	241
3.1.3. Графики смещения, скорости и ускорения .....	242
3.1.4. Основное уравнение динамики гармонических колебаний ..	244
3.1.5. Энергия гармонических колебаний .....	245
3.1.6. Гармонические осцилляторы.....	247
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>250</b>
<b>3.2. Сложение гармонических колебаний.....</b>	<b>251</b>
3.2.1. Способы представления колебаний .....	251
3.2.2. Сложение гармонических колебаний. Биения.....	252
3.2.3. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний .....	255
3.2.4. Фигуры Лиссажу (частные случаи).....	256
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>257</b>

<b>3.3. Влияние внешних сил на колебательные процессы .....</b>	<b>258</b>
3.3.1. Свободные затухающие механические колебания.....	258
3.3.2. Коэффициент затухания и логарифмический декремент затухания .....	259
3.3.3. Вынужденные механические колебания .....	261
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>262</b>
<b>3.4. Упругие волны.....</b>	<b>263</b>
3.4.1. Распространение волн в упругой среде .....	263
3.4.2. Уравнения плоской и сферической волн.....	265
3.4.3. Фазовая скорость. Принцип суперпозиции. Групповая скорость .....	267
3.4.4. Интерференция волн. Стоячие волны .....	269
3.4.5. Волновое уравнение .....	270
3.4.6. Эффект Доплера.....	271
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>276</b>
<b>Примеры решения задач.....</b>	<b>277</b>
<b>Задачи для самостоятельного решения .....</b>	<b>286</b>
<b>4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....</b>	<b>289</b>
<b>4.1. Электрические колебания .....</b>	<b>289</b>
4.1.1. Квазистационарные токи .....	289
4.1.2. Свободные колебания в электрическом контуре без активного сопротивления .....	289
4.1.3. Свободные затухающие электрические колебания .....	291
4.1.4. Вынужденные электрические колебания. Резонанс .....	294
4.1.5. Мощность, выделяемая в цепи переменного тока .....	298
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>299</b>
<b>4.2. Электромагнитные волны .....</b>	<b>300</b>
4.2.1. Генерация электромагнитных волн.....	300
4.2.2. Дифференциальные уравнения ЭМВ.....	302
4.2.3. Экспериментальные исследования ЭМВ .....	304
4.2.4. Энергия и импульс электромагнитного поля.....	308
<b>Вопросы к читателю. Упражнения.....</b>	<b>311</b>
<b>Примеры решения задач.....</b>	<b>313</b>
<b>Задачи для самостоятельного решения .....</b>	<b>319</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>321</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>322</b>
<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ.....</b>	<b>323</b>
<b>ГЛОССАРИЙ.....</b>	<b>341</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>347</b>