

УДК 53  
ББК 22.3  
Н62

**Никеров, Виктор Алексеевич.**

Физика : учебник и сборник задач / В. А. Никеров. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2022. — 580 с.

ISBN 978-5-394-04835-7.

DOI 10.29030/978-5-394-04835-7-2022.

В учебнике последовательно изложены современные представления о механике и молекулярной физике, электродинамике и волновой оптике, квантовой физике. Курс является компактным, но при этом дает цельное представление об основных законах и понятиях современной физики, их взаимосвязи и происхождении. Рассмотрены примеры решения типичных задач и предложен набор задач для самостоятельного решения. Впервые представлена научная аксиоматика современной физики. Акцент в изложении сделан на наиболее перспективные, бурно развивающиеся и финансируемые приложения, и это делает учебник востребованным и современным. В первую очередь речь идет о приложениях физики к современным технологиям, электронике, медицине и биологии. Достоинством учебника является его аналитичность, показывающая связь различных разделов физики.

Для студентов образовательных организаций, реализующих программы высшего образования по укрупненной группе направлений подготовки, входящих в раздел «Инженерное дело, технологии и технические науки» (уровень бакалавриата). Может быть также использован для самообразования преподавателями, аспирантами, инженерами и физиками.

ISBN 978-5-394-04835-7

© Никеров В. А., 2018

© ООО «ИТК «Дашков и К°», 2018

© Никеров В. А., 2022, с изменениями

© ООО «ИТК «Дашков и К°», 2022,  
с изменениями

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	14
<b>ВВЕДЕНИЕ. Научная аксиоматика физики и мироздания</b> .....	18

### Часть I. МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

<b>1. Кинематика материальной точки</b> .....	36
1.1. Механика и ее структура. Материальная точка и твердое тело .....	36
1.2. Перемещение и пройденный путь .....	38
1.3. Скорость, ускорение .....	40
1.4. Тангенциальное, нормальное и полное ускорения .....	42
1.5. Контрольные вопросы и задачи .....	44
<b>2. Динамика материальной точки</b> .....	51
2.1. Первый закон Ньютона .....	52
2.2. Второй закон Ньютона. Масса. Сила. Неинерциальные системы отсчета .....	52
2.3. Третий закон Ньютона .....	55
2.4. Закон сохранения импульса. Центр масс (инерции). Движение центра инерции .....	56
2.5. Контрольные вопросы и задачи .....	58
<b>3. Работа и энергия</b> .....	61
3.1. Работа силы. Мощность .....	62
3.2. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Консервативные и диссипативные силы .....	64
3.3. Связь силы и потенциальной энергии. Условие равновесия .....	65
3.4. Закон сохранения энергии .....	68
3.5. Упругое и неупругое соударение тел .....	70
3.6. Контрольные вопросы и задачи .....	75
<b>4. Кинематика и динамика вращательного движения твердого тела</b> .....	80
4.1. Кинематика твердого тела. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение .....	81
4.2. Работа при вращательном движении. Момент силы .....	83
4.3. Кинетическая энергия при вращательном движении. Момент инерции .....	84
4.4. Теорема Штейнера .....	89
4.5. Уравнение динамики вращательного движения .....	90

4.6. Закон сохранения момента импульса .....	91
4.7. Аналогия между поступательным и вращательным движением .....	92
4.8. Контрольные вопросы и задачи.....	93
<b>5. Гармонические и затухающие колебания.....</b>	<b>97</b>
5.1. Гармонические колебания. Свободные колебания системы .....	98
5.2. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение .....	99
5.3. Затухающие колебания. Коэффициент затухания, декремент, логарифмический декремент, время релаксации .....	102
5.4. Контрольные вопросы и задачи.....	104
<b>6. Сложение колебаний. Вынужденные колебания.....</b>	<b>112</b>
6.1. Представления колебаний .....	112
6.2. Сложение колебаний одинаковой частоты и одинакового направления .....	113
6.3. Сложение колебаний близких частот. Биения .....	114
6.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу .....	115
6.5. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Период и амплитуда вынужденных колебаний .....	117
6.6. Резонанс. Семейство резонансных кривых .....	118
6.7. Контрольные вопросы и задачи.....	120
<b>7. Волны.....</b>	<b>121</b>
7.1. Упругие волны. Продольные и поперечные волны .....	122
7.2. Уравнение плоской волны. Фазовая скорость .....	123
7.3. Волновое уравнение упругой волны и его решение .....	124
7.4. Плотность энергии упругой волны.....	127
7.5. Перенос энергии бегущей волной. Вектор Умова .....	128
7.6. Принцип суперпозиции при сложении волн. Стоячая волна. Колебания струны .....	129
7.7. Контрольные вопросы и задачи .....	131
<b>8. Релятивистская механика.....</b>	<b>132</b>
8.1. Преобразования Галилея и постулаты релятивистской механики .....	133
8.2. Интервал, его инвариантность. Четырехмерный мир Минковского и 4-векторы .....	136
8.3. Преобразования Лоренца .....	138

8.4. Следствия релятивистской механики: замедление времени и сокращение длины.....	141
8.5. Импульс тела и основное уравнение релятивистской динамики .....	142
8.6. Кинетическая и полная энергии в релятивистской механике. Энергия покоя. Релятивистский инвариант ..	144
8.7. Контрольные вопросы и задачи.....	146
<b>9. Молекулярно-кинетическая теория (МКТ).</b>	
<b>Принципы классической статистической физики.....</b>	<b>148</b>
9.1. Физические основы молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа.....	149
9.2. Вывод основного уравнения МКТ .....	150
9.3. Элементы классической статистической физики. Функции распределения и их роль.....	152
9.4. Контрольные вопросы и задачи.....	155
<b>10. Распределение Максвелла и характерные скорости молекул. Барометрическая формула.</b>	
<b>Распределение Больцмана .....</b>	<b>155</b>
10.1. Распределение Максвелла по составляющим скорости.....	156
10.2. Распределение Максвелла по модулю скорости. Нахождение наиболее вероятной, средней, среднеквадратичной скоростей .....	159
10.3. Барометрическая формула .....	161
10.4. Распределение Больцмана .....	163
10.5. Контрольные вопросы и задачи.....	165
<b>11. Элементы физической кинетики. Явления переноса в газах.....</b>	<b>166</b>
11.1. Средняя длина пробега и частота столкновений молекул .....	166
11.2. Общий вид уравнения переноса .....	170
11.3. Диффузия и коэффициент диффузии.....	172
11.4. Теплопроводность и коэффициент теплопроводности .....	173
11.5. Вязкость и коэффициент вязкости .....	174
11.6. Броуновское движение и диффузия .....	176
11.7. Поглощение и рассеяние частиц. Закон Бугера – Ламберта. Транспортировка фотонов и ускоренных частиц через слои вещества в прямолинейном приближении .....	179

11.8. Транспортировка фотонов и ускоренных частиц через слои вещества в диффузионном приближении.....	185
11.9. Контрольные вопросы и задачи.....	190
<b>12. Первое начало термодинамики.....</b>	<b>191</b>
12.1. Первое начало термодинамики и закон сохранения энергии.....	191
12.2. Работа и теплота. Работа, совершаемая газом в различных изопроцессах .....	192
12.3. Внутренняя энергия идеального газа. Степени свободы молекул. Закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы.....	194
12.4. Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме и давлении. Уравнение Майера.....	196
12.5. Адиабатный процесс. Вывод уравнения адиабаты.....	199
12.6. Контрольные вопросы и задачи.....	201
<b>13. Второе начало термодинамики. Энтропия .....</b>	<b>203</b>
13.1. Формулировки второго начала термодинамики .....	203
13.2. КПД кругового процесса.....	204
13.3. Цикл Карно. КПД идеальной тепловой машины. Теоремы Карно.....	206
13.4. Энтропия. Изменение энтропии в процессах идеального газа. Энтропия и термодинамическая вероятность. Формула Больцмана.....	208
13.5. Контрольные вопросы и задачи.....	211
<b>14. Реальные газы. Агрегатные состояния и фазовые переходы .....</b>	<b>212</b>
14.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	213
14.2. Агрегатные состояния и фазовые переходы. Изотермы Ван-дер-Ваальса.....	215
14.3. Внутренняя энергия реального газа .....	217
14.4. Контрольные вопросы и задачи.....	218
<b>Часть II. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА</b>	
<b>15. Закон Кулона и электрическое поле .....</b>	<b>219</b>
15.1. Закон Кулона.....	220
15.2. Электрическое поле и электрическое смещение .....	221
15.3. Принцип суперпозиции электрических полей.....	225
15.4. Электрический диполь. Поле диполя .....	226
15.5. Контрольные вопросы и задачи .....	229

<b>16. Теорема Гаусса для электрического поля</b>	233
16.1. Поток вектора напряженности электрического поля и электрического смещения	234
16.2. Теорема Гаусса в интегральной форме	235
16.3. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости и двух плоскостей	237
16.4. Поле равномерно заряженной бесконечной нити и цилиндрической поверхности	239
16.5. Поле равномерно заряженной сферы	240
16.6. Поле равномерно заряженного шара	241
16.7. Теорема Гаусса в дифференциальной форме	242
16.8. Контрольные вопросы и задачи	243
<b>17. Потенциал электростатического поля</b>	245
17.1. Работа сил электростатического поля. Консервативность электростатических сил	246
17.2. Теорема о циркуляции вектора напряженности поля	247
17.3. Определение потенциала электростатического поля	249
17.4. Связь между потенциалом и напряженностью	250
17.5. Вычисление разности потенциалов в поле заряженных плоскостей, сферы и цилиндрической поверхности	252
17.6. Контрольные вопросы и задачи	253
<b>18. Проводники в электростатическом поле.</b>	
<b>Конденсаторы и энергия электростатического поля</b>	255
18.1. Проводники в электростатическом поле. Поле внутри и вне заряженного проводника	256
18.2. Электрическая емкость проводника	258
18.3. Конденсаторы	259
18.4. Энергия заряженного проводника и конденсатора. Плотность энергии электростатического поля	261
18.5. Контрольные вопросы и задачи	264
<b>19. Диэлектрики в электрическом поле</b>	266
19.1. Поляризация диэлектриков. Полярные и неполярные диэлектрики. Свободные и связанные заряды	267
19.2. Вектор поляризации, диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость	269
19.3. Теорема Гаусса для поля в диэлектрике. Явления на границе раздела двух диэлектриков. Преломление линий смещения и напряженности	270

19.4. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты. Явления на разломах .....	273
19.5. Контрольные вопросы и задачи.....	275
<b>20. Постоянный ток. Законы Ома и Джоуля — Ленца .....</b>	<b>276</b>
20.1. Постоянный ток. Виды тока. Сила тока. Плотность тока.....	277
20.2. Закон Ома в дифференциальной форме.....	278
20.3. Закон Ома в интегральной форме. Сопротивление .....	280
20.4. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Обобщенный закон Ома и закон Ома для замкнутой цепи .....	281
20.5. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах .....	282
20.6. Контрольные вопросы и задачи.....	283
<b>21. Газовый разряд и плазма .....</b>	<b>285</b>
21.1. Проводимость газов. Носители тока. Ионизация и рекомбинация. Несамостоятельный и самостоятельный газы.....	285
21.2. Вольтамперная характеристика газового разряда. Ударная ионизация .....	287
21.3. Типы самостоятельных газовых разрядов .....	289
21.4. Понятие о плазме .....	292
21.5. Контрольные вопросы и задачи.....	294
<b>22. Магнитное поле тока .....</b>	<b>295</b>
22.1. Магнитное поле тока и его проявления. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Магнитный момент.....	296
22.2. Закон Био — Савара — Лапласа и его применение к расчету магнитных полей.....	300
22.3. Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. Расчет поля соленоида и тороида .....	303
22.4. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля в интегральной и дифференциальной форме .....	306
22.5. Действие магнитного поля на токи. Закон Ампера .....	307
22.6. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в однородном и неоднородном магнитных полях .....	308

22.7. Магнитная сила как релятивистская поправка к силе Кулона .....	310
22.8. Контрольные вопросы и задачи.....	318
<b>23. Магнитное поле в веществе .....</b>	<b>320</b>
23.1. Магнитный момент электронов и атомов.	
Намагниченность .....	320
23.2. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики .....	323
23.3. Условия на границе раздела двух магнетиков .....	327
23.4. Контрольные вопросы и задачи.....	329
<b>24. Электромагнитная индукция .....</b>	<b>330</b>
24.1. Основной закон электромагнитной индукции.	
Правило Ленца. Вихревое электрическое поле.	
Генераторы переменного тока.....	331
24.2. Самоиндукция. Индуктивность соленоида .....	333
24.3. Взаимоиндукция .....	335
24.4. Нестационарные процессы в цепи, содержащей индуктивность .....	336
24.5. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля.....	338
24.6. Контрольные вопросы и задачи.....	339
<b>25. Уравнения Максвелла .....</b>	<b>341</b>
25.1. Электромагнитное поле. Ток смещения.	
Уравнения Максвелла в интегральной форме .....	342
25.2. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме.....	345
25.3. Закон сохранения заряда. Теорема Пойнтинга.	
Энергия электромагнитного поля.	
Вектор Умова — Пойнтинга.....	348
25.4. Волновое уравнение. Решения волнового уравнения. Интенсивность электромагнитной волны....	350
25.5. Принцип работы радиоприемника. Шкала электромагнитных волн .....	353
25.6. Контрольные вопросы и задачи.....	355
<b>26. Волновая оптика. Геометрическая оптика.</b>	
<b>Интерференция света.....</b>	<b>356</b>
26.1. Волновая и геометрическая оптика.	
Четыре закона геометрической оптики .....	357
26.2. Интерференция света. Когерентность .....	360
26.3. Принцип Гюйгенса — Френеля.	
Расчет интерференционной картины двух источников.....	363
26.4. Интерференция в тонких пленках .....	366
26.5. Контрольные вопросы и задачи.....	370

<b>27. Дифракция света</b> .....	372
27.1. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии и круглом диске .....	372
27.2. Дифракция в параллельных лучах от одной щели.....	376
27.3. Дифракционная решетка. Условия главных максимумов. Дисперсия и разрешающая способность решетки .....	378
27.4. Дифракция от объемных решеток .....	383
27.5. Контрольные вопросы и задачи.....	384
<b>28. Поляризация света</b> .....	385
28.1. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении и преломлении. Закон Брюстера.....	386
28.2. Поляризационные приборы. Закон Малюса.....	388
28.3. Двойное лучепреломление. Поляризация света в одноосных кристаллах. Построения волновых поверхностей. Призма Николя .....	389
28.4. Контрольные вопросы и задачи.....	392
<b>29. Дисперсия света</b> .....	393
29.1. Нормальная и аномальная дисперсия .....	394
29.2. Электронная теория дисперсии .....	395
29.3. Анализ результатов теории дисперсии .....	397
29.4. Контрольные вопросы и задачи.....	398

### Часть III. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

<b>30. Квантовая природа света. Давление света.</b>	
<b>Фотоэффект и эффект Комптона</b> .....	400
30.1. Квантовая природа света. Фотоны .....	400
30.2. Давление света .....	402
30.3. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна .....	404
30.4. Эффект Комптона .....	406
30.5. Контрольные вопросы и задачи.....	408
<b>31. Квантовая теория излучения</b> .....	411
31.1. Равновесное тепловое излучение. Лучеиспускательная и лучепоглощательная способность. Черное и серое тело .....	411
31.2. Закон Кирхгофа.....	414
31.3. Закон Стефана — Больцмана.....	415
31.4. Закон смещения Вина.....	416
31.5. Формула Рэлея — Джинса .....	417
31.6. Квантовая гипотеза и закон Планка. Связь закона Планка и законов излучения абсолютно черного тела .....	418

31.7. Спонтанное и вынужденное излучения .....	420
31.8. Лазеры .....	423
31.9. Контрольные вопросы и задачи .....	425
<b>32. Планетарная модель атома и спектры .....</b>	<b>427</b>
32.1. Опыты Резерфорда. Классическая модель атома.....	427
32.2. Постулаты Бора и их следствия.....	429
32.3. Дискретность энергетических уровней в атоме и происхождение линейчатых спектров. Опыты Франка и Герца .....	431
32.4. Спектры атома водорода и водородоподобных ионов. Недостатки теории Бора.....	433
32.5. Контрольные вопросы и задачи.....	434
<b>33. Волны де Бройля и волновая функция.....</b>	<b>435</b>
33.1. Гипотеза де Бройля и ее экспериментальное подтверждение .....	436
33.2. Свойства волн де Бройля: фазовая и групповая скорости, дисперсия .....	439
33.3. Волны де Бройля и квантовые условия Бора. Частицы, проявляющие волновые свойства.....	440
33.4. Вероятность местонахождения микрочастицы. Волновая функция. Нормировка и ограничения на волновые функции. Принцип суперпозиции. Средние значения координат.....	442
33.5. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса. Спектральный анализ пространственного цуга волны де Бройля .....	445
33.6. Соотношение неопределенностей для времени и энергии. Короткие и длинные цуги. Принцип соответствия .....	452
33.7. Контрольные вопросы и задачи .....	457
<b>34. Уравнение Шредингера .....</b>	<b>458</b>
34.1. Уравнение Шредингера для свободной частицы.....	459
34.2. Общее уравнение Шредингера .....	460
34.3. Стационарное уравнение Шредингера .....	461
34.4. Уравнения Шредингера в операторной форме. Оператор Гамильтона .....	462
34.5. Связь классической и квантовой механики. Теорема Эренфеста .....	464
34.6. Решение уравнения Шредингера для свободной частицы .....	465
34.7. Контрольные вопросы и задачи.....	465

<b>35. Потенциальный ящик и потенциальный барьер</b> .....	466
35.1. Потенциальный ящик: уравнение Шредингера, граничные условия, волновые функции, энергия и вероятность местонахождения частицы .....	467
35.2. Потенциальный барьер бесконечной ширины. Уравнение Шредингера и его решение для случаев $E < U$ , $E > U$ .....	471
35.3. Потенциальный барьер конечной ширины. Случаи $E > U$ , $E < U$ .....	476
35.4. Туннельный эффект. Коэффициенты прозрачности и отражения .....	479
35.5. Контрольные вопросы и задачи .....	481
<b>36. Гармонический осциллятор</b> .....	482
36.1. Потенциальная яма .....	483
36.2. Исходная классическая теория гармонического осциллятора .....	485
36.3. Квантовая теория гармонического осциллятора .....	486
36.4. Волновые функции и энергетические уровни квантового осциллятора .....	489
36.5. Контрольные вопросы и задачи .....	491
<b>37. Квантовая теория водородоподобного атома</b> .....	492
37.1. Уравнение Шредингера для электрона в водородоподобном атоме .....	493
37.2. Квантовые числа. Возбужденные состояния электрона в водородоподобном атоме и спектры .....	495
37.3. Спин электрона. Кратность вырождения уровней водородоподобных атомов .....	497
37.4. 1s-состояние атома водорода .....	498
37.5. Спин-орбитальное взаимодействие. Эффекты Зеемана и Штарка .....	499
37.6. Контрольные вопросы и задачи .....	501
<b>38. Квантовая теория многоэлектронных атомов</b> .....	502
38.1. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны .....	502
38.2. Принцип Паули .....	504
38.3. Строение многоэлектронных атомов .....	505
38.4. Рентгеновские спектры .....	507
38.5. Контрольные вопросы и задачи .....	509
<b>39. Квантовая теория молекул</b> .....	510
39.1. Гетерополярная и гомеополярная связи. Обменное взаимодействие .....	511

39.2. Образование молекул .....	512
39.3. Колебательная и вращательная энергия молекул .....	514
39.4. Контрольные вопросы и задачи .....	516
<b>40. Элементы физики твердого тела.....</b>	<b>517</b>
40.1. Качественное обоснование зонной теории. Адиабатное приближение. Одноэлектронное приближение. Самосогласованное поле .....	518
40.2. Уравнение Шредингера для кристаллов. Теорема Блоха и туннелирование .....	519
40.3. Решение уравнения Шредингера в приближении слабой связи .....	521
40.4. Зоны Бриллюэна и эффективная масса электрона .....	524
40.5. Приближение сильной связи .....	526
40.6. Металлы, диэлектрики, полупроводники по зонной теории .....	527
40.7. Контрольные вопросы и задачи .....	529
<b>41. Строение атомного ядра. Радиоактивность.....</b>	<b>530</b>
41.1. Заряд, масса, радиус, спин, квантовый характер ядра .....	530
41.2. Удельная энергия связи ядер разных элементов. Модели ядра .....	532
41.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада .....	535
41.4. $\alpha$ -распад, $\beta$ -распад. Нейтрино .....	537
41.5. $\gamma$ -излучение и его свойства .....	540
41.6. Искусственная радиоактивность .....	542
41.7. Регистрация и дозы радиоактивных излучений .....	545
41.8. Контрольные вопросы и задачи .....	547
<b>42. Современная физическая картина мира.....</b>	<b>548</b>
42.1. Космические лучи .....	549
42.2. Четыре вида фундаментальных взаимодействий .....	550
42.3. Элементарные и фундаментальные частицы. Кварки .....	552
42.4. Эволюция Вселенной .....	554
42.5. Контрольные вопросы и задачи .....	556
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>558</b>
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И ВЕЛИЧИНЫ.....</b>	<b>560</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>561</b>