

УДК 53  
ББК 22.3  
Н62

**Автор:**

*В. А. Никеров* – профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Рецензенты:**

*В. Р. Никитенко* – профессор, доктор физико-математических наук; профессор Отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

*А. П. Тютнев* – доктор физико-математических наук, профессор-исследователь Департамента электронной инженерии, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова.

Автор иллюстраций – академик Российской академии наук *А. Т. Фоменко*.

**Никеров, Виктор Алексеевич.**

**Н62** Физика. Современный краткий курс : учебник / В. А. Никеров. — Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2023. — 441 с.

ISBN 978-5-394-05378-8.

В учебнике на основе современной научной физической аксиоматики последовательно изложены современные представления о механике и молекулярной физике, электродинамике и волновой оптике, квантовой физике. Курс является кратким, но при этом дает цельное представление об основных законах и понятиях современной физики, их взаимосвязи и происхождении. 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 направлениям подготовки и специальностям, входящим в укрупненную группу «Инженерное дело, технологии и технические науки». Может быть также использован для самообразования преподавателями, аспирантами, инженерами и физиками.

ISBN 978-5-394-05378-8

© Никеров В. А., 2023

© ООО «ИТК «Дашков и К°», 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	16
<b>ВВЕДЕНИЕ. Краткая научная аксиоматика физики и мироздания</b> .....	21

## Часть I. МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

<b>1. Кинематика материальной точки</b> .....	27
1.1. Механика и ее структура. Материальная точка и твердое тело .....	27
1.2. Перемещение и пройденный путь .....	29
1.3. Скорость, ускорение .....	30
1.4. Тангенциальное, нормальное и полное ускорения .....	33
<b>2. Динамика материальной точки</b> .....	34
2.1. Первый закон Ньютона .....	34
2.2. Второй закон Ньютона. Масса. Сила. Неинерциальные системы отсчета .....	35
2.3. Третий закон Ньютона .....	37
2.4. Закон сохранения импульса. Центр масс (инерции). Движение центра инерции .....	38
<b>3. Работа и энергия</b> .....	40
3.1. Работа силы. Мощность .....	40
3.2. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Консервативные и диссипативные силы .....	42
3.3. Связь силы и потенциальной энергии. Условие равновесия .....	43
3.4. Закон сохранения энергии .....	47
3.5. Упругое и неупругое соударение тел .....	48

## 4. Кинематика и динамика вращательного движения

<b>твердого тела</b> .....	53
4.1. Кинематика твердого тела. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение .....	54
4.2. Работа при вращательном движении. Момент силы .....	55
4.3. Кинетическая энергия при вращательном движении. Момент инерции .....	56
4.4. Теорема Штейнера .....	61
4.5. Уравнение динамики вращательного движения .....	62
4.6. Закон сохранения момента импульса .....	63
4.7. Аналогия между поступательным и вращательным движением .....	65

## 5. Гармонические и затухающие колебания .....

5.1. Гармонические колебания. Свободные колебания системы .....	66
5.2. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение .....	65
5.3. Затухающие колебания. Коэффициент затухания, декремент, логарифмический декремент, время релаксации .....	69

## 6. Сложение колебаний. Вынужденные колебания .....

6.1. Представления колебаний .....	72
6.2. Сложение колебаний одинаковой частоты и одинакового направления .....	73
6.3. Сложение колебаний близких частот. Биения .....	74
6.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу .....	75
6.5. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Период и амплитуда вынужденных колебаний .....	77
6.6. Резонанс. Семейство резонансных кривых .....	78

## 7. Волны .....

7.1. Упругие волны. Продольные и поперечные волны .....	79
---	----

7.2. Уравнение плоской волны. Фазовая скорость .....	81
7.3. Волновое уравнение упругой волны и его решение .....	82
7.4. Плотность энергии упругой волны .....	85
7.5. Перенос энергии бегущей волной. Вектор Умова .....	86
7.6. Принцип суперпозиции при сложении волн. Стоячая волна. Колебания струны .....	87
<b>8. Релятивистская механика .....</b>	<b>89</b>
8.1. Преобразования Галилея и постулаты релятивистской механики .....	89
8.2. Интервал, его инвариантность. Четырехмерный мир Минковского и 4-векторы .....	92
8.3. Преобразования Лоренца .....	94
8.4. Следствия релятивистской механики: замедление времени и сокращение длины .....	96
8.5. Импульс тела и основное уравнение релятивистской динамики .....	98
8.6. Кинетическая и полная энергии в релятивистской механике. Энергия покоя. Релятивистский инвариант .....	100
<b>9. Молекулярно-кинетическая теория (МКТ). Принципы классической статистической физики .....</b>	<b>102</b>
9.1. Физические основы молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа .....	102
9.2. Вывод основного уравнения МКТ .....	104
9.3. Элементы классической статистической физики. Функции распределения и их роль .....	105
<b>10. Распределение Максвелла и характерные скорости молекул. Барометрическая формула. Распределение Больцмана .....</b>	<b>108</b>
10.1. Распределение Максвелла по составляющим скорости .....	108
10.2. Распределение Максвелла по модулю скорости. Нахождение наиболее вероятной, средней, среднеквадратичной скоростей .....	112

10.3. Барометрическая формула .....	114
10.4. Распределение Больцмана .....	116
<b>11. Элементы физической кинетики. Явления переноса</b>	
<b>в газах</b> .....	117
11.1. Средняя длина пробега и частота столкновений молекул .....	117
11.2. Общий вид уравнения переноса .....	120
11.3. Диффузия и коэффициент диффузии .....	122
11.4. Теплопроводность и коэффициент теплопроводности .....	124
11.5. Вязкость и коэффициент вязкости .....	125
11.6. Броуновское движение и диффузия .....	127
11.7. Поглощение и рассеяние частиц. Закон Бугера – Ламберта. Транспортировка фотонов и ускоренных частиц через слои вещества .....	129
<b>12. Первое начало термодинамики</b> .....	132
12.1. Первое начало термодинамики и закон сохранения энергии .....	133
12.2. Работа и теплота. Работа, совершаемая газом в различных изопроцессах .....	133
12.3. Внутренняя энергия идеального газа. Степени свободы молекул. Закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы .....	135
12.4. Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме и давлении. Уравнение Майера .....	137
12.5. Адиабатный процесс. Вывод уравнения адиабаты .....	140
<b>13. Второе начало термодинамики. Энтропия</b> .....	142
13.1. Формулировки второго начала термодинамики .....	142
13.2. КПД кругового процесса .....	143
13.3. Цикл Карно. КПД идеальной тепловой машины. Теоремы Карно .....	145

13.4. Энтропия. Изменение энтропии в процессах идеального газа. Энтропия и термодинамическая вероятность. Формула Больцмана.....	147
--	-----

<b>14. Реальные газы. Агрегатные состояния и фазовые переходы .....</b>	<b>150</b>
14.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	150
14.2. Агрегатные состояния и фазовые переходы. Изотермы Ван-дер-Ваальса .....	152
14.3. Внутренняя энергия реального газа .....	154

## Часть II. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

<b>15. Закон Кулона и электрическое поле .....</b>	<b>157</b>
15.1. Закон Кулона.....	157
15.2. Электрическое поле и электрическое смещение .....	159
15.3. Принцип суперпозиции электрических полей.....	162
15.4. Электрический диполь. Поле диполя .....	163
<b>16. Теорема Гаусса для электрического поля.....</b>	<b>166</b>
16.1. Поток вектора напряженности электрического поля и электрического смещения.....	166
16.2. Теорема Гаусса в интегральной форме.....	167
16.3. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости и двух плоскостей .....	169
16.4. Поле равномерно заряженной бесконечной нити и цилиндрической поверхности .....	171
16.5. Поле равномерно заряженной сферы.....	172
16.6. Поле равномерно заряженного шара .....	173
16.7. Теорема Гаусса в дифференциальной форме .....	174
<b>17. Потенциал электростатического поля .....</b>	<b>175</b>
17.1. Работа сил электростатического поля. Консервативность электростатических сил .....	175

17.2. Теорема о циркуляции вектора напряженности поля .....	177
17.3. Определение потенциала электростатического поля .....	178
17.4. Связь между потенциалом и напряженностью .....	180
17.5. Вычисление разности потенциалов в поле заряженных плоскостей, сферы и цилиндрической поверхности.....	181

## **18. Проводники в электростатическом поле.**

<b>Конденсаторы и энергия электростатического поля.....</b>	<b>182</b>
18.1. Проводники в электростатическом поле. Поле внутри и вне заряженного проводника .....	182
18.2. Электрическая емкость проводника.....	184
18.3. Конденсаторы.....	185
18.4. Энергия заряженного проводника и конденсатора. Плотность энергии электростатического поля .....	188

## **19. Диэлектрики в электрическом поле .....**

19.1. Поляризация диэлектриков. Полярные и неполярные диэлектрики. Свободные и связанные заряды .....	190
19.2. Вектор поляризации, диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость .....	192
19.3. Теорема Гаусса для поля в диэлектрике. Явления на границе раздела двух диэлектриков. Преломление линий смещения и напряженности .....	194
19.4. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты. Явления на разломах .....	197

## **20. Постоянный ток. Законы Ома и Джоуля — Ленца .....**

20.1. Постоянный ток. Виды тока. Сила тока. Плотность тока.....	199
20.2. Закон Ома в дифференциальной форме.....	198
20.3. Закон Ома в интегральной форме. Соппротивление .....	201

20.4. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Обобщенный закон Ома и закон Ома для замкнутой цепи .....	202
20.5. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах .....	203
<b>21. Газовый разряд и плазма .....</b>	<b>204</b>
21.1. Проводимость газов. Носители тока. Ионизация и рекомбинация. Несамостоятельный и самостоятельный газовые разряды .....	204
21.2. Вольтамперная характеристика газового разряда. Ударная ионизация .....	206
21.3. Типы самостоятельных газовых разрядов .....	208
21.4. Понятие о плазме .....	211
<b>22. Магнитное поле тока .....</b>	<b>213</b>
22.1. Магнитное поле тока и его проявления. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Магнитный момент .....	213
22.2. Закон Био — Савара — Лапласа и его применение к расчету магнитных полей .....	217
22.3. Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. Расчет поля соленоида и тороида .....	219
22.4. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля в интегральной и дифференциальной форме .....	222
22.5. Действие магнитного поля на токи. Закон Ампера .....	224
22.6. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в однородном и неоднородном магнитных полях .....	225
22.7. Магнитная сила как релятивистская поправка к силе Кулона .....	227
<b>23. Магнитное поле в веществе .....</b>	<b>234</b>
23.1. Магнитный момент электронов и атомов. Намагниченность .....	234
23.2. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики .....	238



23.3. Условия на границе раздела двух магнетиков .....	241
<b>24. Электромагнитная индукция .....</b>	<b>244</b>
24.1. Основной закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Вихревое электрическое поле. Генераторы переменного тока.....	244
24.2. Самоиндукция. Индуктивность соленоида .....	246
24.3. Взаимоиндукция .....	247
24.4. Нестационарные процессы в цепи, содержащей индуктивность.....	249
24.5. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля .....	251
<b>25. Уравнения Максвелла .....</b>	<b>252</b>
25.1. Электромагнитное поле. Ток смещения. Уравнения Максвелла в интегральной форме .....	252
25.2. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме.....	255
25.3. Закон сохранения заряда. Теорема Пойнтинга. Энергия электромагнитного поля. Вектор Умова — Пойнтинга .....	259
25.4. Волновое уравнение. Решения волнового уравнения. Интенсивность электромагнитной волны .....	261
25.5. Принцип работы радиоприемника. Шкала электромагнитных волн .....	263
<b>26. Волновая оптика. Геометрическая оптика. Интерференция света .....</b>	<b>266</b>
26.1. Волновая и геометрическая оптика. Четыре закона геометрической оптики .....	266
26.2. Интерференция света. Когерентность .....	269
26.3. Принцип Гюйгенса — Френеля. Расчет интерференционной картины двух источников.....	272
26.4. Интерференция в тонких пленках .....	275
<b>27. Дифракция света .....</b>	<b>280</b>
27.1. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии и круглом диске .....	280

27.2. Дифракция в параллельных лучах от одной щели.....	283
27.3. Дифракционная решетка. Условия главных максимумов. Дисперсия и разрешающая способность решетки.....	286
27.4. Дифракция от объемных решеток.....	290
<b>28. Поляризация света .....</b>	<b>291</b>
28.1. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении и преломлении. Закон Брюстера .....	291
28.2. Поляризационные приборы. Закон Малюса.....	293
28.3. Двойное лучепреломление. Поляризация света в одноосных кристаллах. Построения волновых поверхностей. Призма Николя .....	295
<b>29. Дисперсия света .....</b>	<b>297</b>
29.1. Нормальная и аномальная дисперсия .....	297
29.2. Электронная теория дисперсии .....	298
29.3. Анализ результатов теории дисперсии .....	300

### Часть III. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

<b>30. Квантовая природа света. Давление света. Фотоэффект и эффект Комптона .....</b>	<b>305</b>
30.1. Квантовая природа света. Фотоны .....	305
30.2. Давление света .....	307
30.3. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна .....	308
30.4. Эффект Комптона .....	311
<b>31. Квантовая теория излучения .....</b>	<b>313</b>
31.1. Равновесное тепловое излучение. Лучеиспускательная и лучепоглощательная способность. Черное и серое тело.....	313
31.2. Закон Кирхгофа.....	315
31.3. Закон Стефана — Больцмана.....	317
31.4. Закон смещения Вина.....	317

31.5. Формула Рэлея — Джинса .....	319
31.6. Квантовая гипотеза и закон Планка. Связь закона Планка и законов излучения абсолютно черного тела .....	320
31.7. Спонтанное и вынужденное излучения .....	322
31.8. Лазеры .....	325
<b>32. Планетарная модель атома и спектры .....</b>	<b>327</b>
32.1. Опыты Резерфорда. Классическая модель атома .....	327
32.2. Постулаты Бора и их следствия .....	329
32.3. Дискретность энергетических уровней в атоме и происхождение линейчатых спектров. Опыты Франка и Герца .....	331
32.4. Спектры атома водорода и водородоподобных ионов. Недостатки теории Бора .....	332
<b>33. Волны де Бройля и волновая функция .....</b>	<b>334</b>
33.1. Гипотеза де Бройля и ее экспериментальное подтверждение .....	334
33.2. Свойства волн де Бройля: фазовая и групповая скорости, дисперсия .....	336
33.3. Волны де Бройля и квантовые условия Бора. Частицы, проявляющие волновые свойства .....	338
33.4. Вероятность местонахождения микрочастицы. Волновая функция. Нормировка и ограничения на волновые функции. Принцип суперпозиции. Средние значения координат .....	340
33.5. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса. Спектральный анализ пространственного цуга волн де Бройля .....	343
33.6. Соотношение неопределенностей для времени и энергии. Короткие и длинные цуги. Принцип соответствия .....	348
<b>34. Уравнение Шредингера .....</b>	<b>352</b>
34.1. Уравнение Шредингера для свободной частицы .....	352
34.2. Общее уравнение Шредингера .....	353
34.3. Стационарное уравнение Шредингера .....	354

34.4. Уравнения Шредингера в операторной форме. Оператор Гамильтона.....	355
34.5. Связь классической и квантовой механики. Теорема Эренфеста.....	357
34.6. Решение уравнения Шредингера для свободной частицы.....	358
<b>35. Потенциальный ящик и потенциальный барьер.....</b>	<b>359</b>
35.1. Потенциальный ящик: уравнение Шредингера, граничные условия, волновые функции, энергия и вероятность местонахождения частицы.....	359
35.2. Потенциальный барьер бесконечной ширины. Уравнение Шредингера и его решение для случаев $E < U$ , $E > U$ .....	363
35.3. Потенциальный барьер конечной ширины. Случаи $E > U$ , $E < U$ .....	368
35.4. Туннельный эффект. Коэффициенты прозрачности и отражения.....	371
<b>36. Гармонический осциллятор .....</b>	<b>373</b>
36.1. Потенциальная яма .....	373
36.2. Исходная классическая теория гармонического осциллятора.....	375
36.3. Квантовая теория гармонического осциллятора.....	377
36.4. Волновые функции и энергетические уровни квантового осциллятора.....	380
<b>37. Квантовая теория водородоподобного атома.....</b>	<b>381</b>
37.1. Уравнение Шредингера для электрона в водородоподобном атоме.....	381
37.2. Квантовые числа. Возбужденные состояния электрона в водородоподобном атоме и спектры.....	383
37.3. Спин электрона. Кратность вырождения уровней водородоподобных атомов .....	385
37.4. 1s-состояние атома водорода .....	386
37.5. Спин-орбитальное взаимодействие. Эффекты Зеемана и Штарка .....	388

<b>38. Квантовая теория многоэлектронных атомов</b>	389
38.1. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны	389
38.2. Принцип Паули	391
38.3. Строение многоэлектронных атомов	392
38.4. Рентгеновские спектры	394
<b>39. Квантовая теория молекул</b>	396
39.1. Гетерополярная и гомеополярная связи. Обменное взаимодействие	396
39.2. Образование молекул	398
39.3. Колебательная и вращательная энергия молекул	399
<b>40. Элементы физики твердого тела</b>	402
40.1. Качественное обоснование зонной теории. Адиабатное приближение. Одноэлектронное приближение. Самосогласованное поле	402
40.2. Уравнение Шредингера для кристаллов. Теорема Блоха и туннелирование	403
40.3. Решение уравнения Шредингера в приближении слабой связи	405
40.4. Зоны Бриллюэна и эффективная масса электрона	408
40.5. Приближение сильной связи	410
40.6. Металлы, диэлектрики, полупроводники по зонной теории	411
<b>41. Строение атомного ядра. Радиоактивность</b>	413
41.1. Заряд, масса, радиус, спин, квантовый характер ядра	413
41.2. Удельная энергия связи ядер разных элементов. Модели ядра	415
41.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада	417
41.4. $\alpha$ -распад, $\beta$ -распад. Нейтрино	419
41.5. $\gamma$ -излучение и его свойства	422
41.6. Искусственная радиоактивность	424
41.7. Регистрация и дозы радиоактивных излучений	427

<b>42. Современная физическая картина мира .....</b>	<b>429</b>
42.1. Космические лучи.....	429
42.2. Четыре вида фундаментальных взаимодействий.....	430
42.3. Элементарные и фундаментальные частицы. Кварки.....	432
42.4. Эволюция Вселенной .....	434
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>437</b>
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И ВЕЛИЧИНЫ .....</b>	<b>439</b>