



ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. А. Никеров

ФИЗИКА

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественнонаучным направлениям и специальностям*

*Допущено Научно-методическим Советом по физике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по техническим направлениям подготовки
и специальностям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2015

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
Н62

Автор:

Никеров Виктор Алексеевич — профессор, доктор физико-математических наук, профессор общеуниверситетской кафедры физики Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Рецензенты:

Смык А. Ф. — доктор физико-математических наук, заведующая кафедрой физики Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ);

Никитенко В. Р. — доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой физики конденсированных сред, в 2007–2011 гг. — профессор кафедры физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Никеров, В. А.

Н62 Физика : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Никеров. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 415 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-4820-2

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 типовых задач. В рамках соответствия актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования дано представление о ключевых понятиях и подходах 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.

Учебник подготовлен на основе курса лекций, прочитанных автором в Московском институте электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Для студентов инженерно-технических и иных вузов, а также для самоподготовки и повторения ранее изученного материала. Может быть также использован преподавателями для самообразования и подготовки к занятиям.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

V. A. Nikerov

PHYSICS

Tutorial and workshop for academic Bachelor's degree

*Approved by the Ministry of Education and Science
of the Russian Federation*

Abstract

The textbook represents the modern view on the mechanics and molecular physics, electrodynamics and wave optics, and quantum physics. The course is compact, but it gives a complete view on the basic modern physics laws and concepts including their origin and relationship. The examples of typical physical problems solutions are represented. The key concepts and approaches of today's physics corresponding to the State educational standards are considered.

The emphasis in the presentation of the most perspective and rapidly developing applications is made, and that makes textbook popular and modern in fact. First of all, we are talking about the applications of physics to modern technology, electronics, medicine and biology.

The textbook is based on the course of lectures read by the author at the Moscow Institute of Electronics and Mathematics of National Research University Higher School of Economics.

For students of technical and other universities, as well as for self-study and repetition of previously learned material. It may also be used by teachers for self-study and preparation for classes.

Оглавление

Предисловие.....	13
------------------	----

Раздел I МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 1. Кинематика материальной точки	17
1.1. Механика и ее структура. Материальная точка и твердое тело.....	17
1.2. Перемещение и пройденный путь	18
1.3. Скорость, ускорение	19
1.4. Тангенциальное, нормальное и полное ускорения.....	21
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>22</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>22</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>25</i>
Глава 2. Динамика материальной точки	27
2.1. Первый закон Ньютона	27
2.2. Второй закон Ньютона. Масса. Сила. Неинерциальные системы отсчета....	28
2.3. Третий закон Ньютона.....	29
2.4. Закон сохранения импульса. Центр масс (инерции). Движение центра инерции	30
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>31</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>32</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>33</i>
Глава 3. Работа и энергия	34
3.1. Работа силы. Мощность	34
3.2. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Консервативные и диссипативные силы.....	35
3.3. Связь силы и потенциальной энергии. Условие равновесия	36
3.4. Закон сохранения энергии	39
3.5. Упругое и неупругое соударение тел.....	40
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>43</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>44</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>45</i>
Глава 4. Кинематика и динамика вращательного движения твердого тела.....	46
4.1. Кинематика твердого тела. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение	46
4.2. Работа при вращательном движении. Момент силы	48
4.3. Кинетическая энергия при вращательном движении. Момент инерции.....	48
4.4. Теорема Штейнера	51

4.5. Уравнение динамики вращательного движения	52
4.6. Закон сохранения момента импульса	52
4.7. Аналогия между поступательным и вращательным движением.....	53
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	54
<i>Задачи с решениями</i>	54
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	55
Глава 5. Гармонические и затухающие колебания	57
5.1. Гармонические колебания. Свободные колебания системы	57
5.2. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение ..58	
5.3. Затухающие колебания. Коэффициент затухания, декремент, логарифмический декремент, время релаксации	60
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	62
<i>Задачи с решениями</i>	62
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	66
Глава 6. Сложение колебаний. Вынужденные колебания.....	68
6.1. Представления колебаний.....	68
6.2. Сложение колебаний одинаковой частоты и одинакового направления.....	69
6.3. Сложение колебаний близких частот. Биения	69
6.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу	70
6.5. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Период и амплитуда вынужденных колебаний.....	71
6.6. Резонанс. Семейство резонансных кривых	72
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	73
<i>Задача с решением</i>	74
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	74
Глава 7. Волны.....	75
7.1. Упругие волны. Продольные и поперечные волны.....	75
7.2. Уравнение плоской волны. Фазовая скорость.....	76
7.3. Волновое уравнение упругой волны и его решение.....	77
7.4. Плотность энергии упругой волны	79
7.5. Перенос энергии бегущей волной. Вектор Умова	81
7.6. Принцип суперпозиции при сложении волн. Стоячая волна. Колебания струны	81
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	83
<i>Задача с решением</i>	83
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	83
Глава 8. Релятивистская механика	84
8.1. Преобразования Галилея и постулаты релятивистской механики	84
8.2. Интервал, его инвариантность. Четырехмерный мир Минковского и 4-векторы.....	86
8.3. Преобразования Лоренца	88
8.4. Следствия релятивистской механики: замедление времени и сокращение длины	90
8.5. Импульс тела и основное уравнение релятивистской динамики	91
8.6. Кинетическая и полная энергии в релятивистской механике. Энергия покоя. Релятивистский инвариант.....	92
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	94
<i>Задачи с решениями</i>	94
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	95

Глава 9. Молекулярно-кинетическая теория. Принципы классической статистической физики	96
9.1. Физические основы молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа.....	96
9.2. Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории.....	97
9.3. Элементы классической статистической физики. Функции распределения и их роль	99
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>101</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>101</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>101</i>
Глава 10. Распределение Максвелла и характерные скорости молекул. Барометрическая формула. Распределение Больцмана	102
10.1. Распределение Максвелла по составляющим скорости	102
10.2. Распределение Максвелла по модулю скорости. Нахождение скоростей.....	105
10.3. Барометрическая формула	106
10.4. Распределение Больцмана	107
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>108</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>109</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>109</i>
Глава 11. Элементы физической кинетики. Явления переноса в газах.....	110
11.1. Средняя длина пробега и частота столкновений молекул.....	110
11.2. Общий вид уравнения переноса	112
11.3. Диффузия и коэффициент диффузии.....	114
11.4. Теплопроводность и коэффициент теплопроводности.....	115
11.5. Вязкость и коэффициент вязкости.....	116
11.6. Броуновское движение и диффузия	117
11.7. Поглощение и рассеяние частиц. Закон Бугера – Ламберта. Транспортировка частиц через среды.....	119
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>122</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>122</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>122</i>
Глава 12. Первое начало термодинамики	123
12.1. Первое начало термодинамики и закон сохранения энергии	123
12.2. Работа и теплота	124
12.3. Внутренняя энергия идеального газа.....	125
12.4. Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме и давлении. Уравнение Майера.....	127
12.5. Адиабатный процесс. Вывод уравнения адиабаты.....	129
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>131</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>131</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>132</i>
Глава 13. Второе начало термодинамики. Энтропия.....	133
13.1. Формулировки второго начала термодинамики	133
13.2. Коэффициент полезного действия кругового процесса.....	134
13.3. Цикл Карно. КПД идеальной тепловой машины. Теоремы Карно.....	135
13.4. Энтропия	137
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>139</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>139</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>140</i>

Глава 14. Реальные газы. Агрегатные состояния и фазовые переходы	141
14.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	141
14.2. Агрегатные состояния и фазовые переходы. Изотермы Ван-дер-Ваальса....	143
14.3. Внутренняя энергия реального газа	144
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>145</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>145</i>
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	<i>145</i>

Раздел II ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Глава 15. Закон Кулона и электрическое поле.....	149
15.1. Закон Кулона.....	149
15.2. Электрическое поле и электрическое смещение	151
15.3. Принцип суперпозиции электрических полей.....	153
15.4. Электрический диполь. Поле диполя	154
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>156</i>
<i>Задачи с решениями</i>	<i>156</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>158</i>

Глава 16. Теорема Гаусса для электрического поля	159
16.1. Поток вектора напряженности электрического поля и электрического смещения	159
16.2. Теорема Гаусса в интегральной форме.....	160
16.3. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости и двух плоскостей.....	161
16.4. Поле равномерно заряженной бесконечной нити.....	163
16.5. Поле равномерно заряженной сферы	163
16.6. Поле равномерно заряженного шара	164
16.7. Теорема Гаусса в дифференциальной форме.....	165
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>165</i>
<i>Задачи с решениями</i>	<i>165</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>166</i>

Глава 17. Потенциал электростатического поля.....	168
17.1. Работа сил электростатического поля. Консервативность электростатических сил	168
17.2. Теорема о циркуляции вектора напряженности поля.....	169
17.3. Определение потенциала электростатического поля	170
17.4. Связь между потенциалом и напряженностью	171
17.5. Вычисление разности потенциалов для некоторых видов полей.....	172
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>174</i>
<i>Задачи с решениями</i>	<i>174</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>175</i>

Глава 18. Проводники в электростатическом поле. Конденсаторы и энергия электростатического поля.....	176
18.1. Проводники в электростатическом поле. Поле внутри и вне заряженного проводника.....	176
18.2. Электрическая емкость проводника	178
18.3. Конденсаторы	179
18.4. Энергия заряженного проводника и конденсатора. Плотность энергии электростатического поля	180

<i>Контрольные вопросы и задания</i>	182
<i>Задачи с решениями</i>	183
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	183
Глава 19. Диэлектрики в электрическом поле	185
19.1. Поляризация диэлектриков. Полярные и неполярные диэлектрики. Свободные и связанные заряды	185
19.2. Вектор поляризации, диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость	186
19.3. Теорема Гаусса для поля в диэлектрике. Явления на границе раздела двух диэлектриков. Преломление линий смещения и напряженности	188
19.4. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты. Явления на разломах	189
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	191
<i>Задача с решением</i>	191
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	191
Глава 20. Постоянный ток. Законы Ома и Джоуля – Ленца	192
20.1. Постоянный ток. Виды тока. Сила тока. Плотность тока	192
20.2. Закон Ома в дифференциальной форме	193
20.3. Закон Ома в интегральной форме. Сопротивление	194
20.4. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Обобщенный закон Ома и закон Ома для замкнутой цепи	195
20.5. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной и интегральной формах	196
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	196
<i>Задачи с решениями</i>	197
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	197
Глава 21. Газовый разряд и плазма	199
21.1. Проводимость газов. Газовые разряды	199
21.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда. Ударная ионизация	201
21.3. Типы самостоятельных газовых разрядов	202
21.4. Понятие о плазме	204
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	205
<i>Задача с решением</i>	206
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	206
Глава 22. Магнитное поле тока	207
22.1. Магнитное поле тока и его проявления. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Магнитный момент	207
22.2. Закон Био – Савара – Лапласа и его применение к расчету магнитных полей	210
22.3. Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. Расчет полей соленоида и тороида	212
22.4. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса	214
22.5. Действие магнитного поля на токи. Закон Ампера	215
22.6. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца	216
22.7. Магнитная сила как релятивистская поправка к силе Кулона	218
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	223
<i>Задачи с решениями</i>	223
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	224
Глава 23. Магнитное поле в веществе	225
23.1. Магнитный момент электронов и атомов. Намагниченность	225

23.2. Диамagnetики, парамагнетики, ферромагнетики	228
23.3. Условия на границе раздела двух магнетиков.....	230
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	231
<i>Задача с решением</i>	232
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	232
Глава 24. Электромагнитная индукция	233
24.1. Основной закон электромагнитной индукции	233
24.2. Самоиндукция. Индуктивность соленоида	235
24.3. Взаимоиндукция.....	236
24.4. Нестационарные процессы в цепи, содержащей индуктивность.....	237
24.5. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля	239
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	240
<i>Задача с решением</i>	240
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	241
Глава 25. Уравнения Максвелла	242
25.1. Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла в интегральной форме ..	242
25.2. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме	245
25.3. Следствия из уравнений Максвелла.....	247
25.4. Волновое уравнение и его решения.....	249
25.5. Принцип работы радиоприемника. Шкала электромагнитных волн	251
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	252
<i>Задача с решением</i>	253
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	253
Глава 26. Волновая оптика. Геометрическая оптика. Интерференция света ...	254
26.1. Волновая и геометрическая оптика. Законы геометрической оптики ..	254
26.2. Интерференция света. Когерентность.....	257
26.3. Принцип Гюйгенса — Френеля. Расчет интерференционной картины двух источников	259
26.4. Интерференция в тонких пленках	261
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	263
<i>Задача с решением</i>	263
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	264
Глава 27. Дифракция света	265
27.1. Метод зон Френеля. Дифракция на круглом отверстии и круглом диске...265	265
27.2. Дифракция в параллельных лучах от одной щели	268
27.3. Дифракционная решетка. Условия главных максимумов. Дисперсия и разрешающая способность решетки.....	270
27.4. Дифракция от объемных решеток.....	273
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	274
<i>Задачи с решениями</i>	274
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	274
Глава 28. Поляризация света	276
28.1. Естественный и поляризованный свет. Закон Брюстера	276
28.2. Поляризационные приборы. Закон Малюса.....	277
28.3. Двойное лучепреломление.....	278
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	280
<i>Задача с решением</i>	280
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	281

Глава 29. Дисперсия света	282
29.1. Нормальная и аномальная дисперсии	282
29.2. Электронная теория дисперсии	283
29.3. Анализ результатов теории дисперсии	285
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>286</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>286</i>
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	<i>286</i>

Раздел III КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 30. Квантовая природа света. Давление света. Фотоэффект и эффект Комптона	289
30.1. Квантовая природа света. Фотоны	289
30.2. Давление света	291
30.3. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна	292
30.4. Эффект Комптона	294
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>295</i>
<i>Задачи с решениями</i>	<i>295</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>296</i>
Глава 31. Квантовая теория излучения	297
31.1. Равновесное тепловое излучение. Лучеиспускательная и лучепоглощательная способности	297
31.2. Закон Кирхгофа	299
31.3. Закон Стефана — Больцмана	300
31.4. Закон смещения Вина	301
31.5. Формула Рэлея — Джинса	302
31.6. Квантовая гипотеза и закон Планка	303
31.7. Спонтанное и вынужденное излучения	304
31.8. Лазеры	306
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>307</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>308</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>308</i>
Глава 32. Планетарная модель атома и спектры	309
32.1. Опыты Резерфорда. Классическая модель атома	309
32.2. Постулаты Бора и их следствия	311
32.3. Дискретность энергетических уровней в атоме и происхождение линейчатых спектров	312
32.4. Спектры атома водорода и водородоподобных ионов. Недостатки теории Бора	313
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>315</i>
<i>Задача с решением</i>	<i>315</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>315</i>
Глава 33. Волны де Бройля и волновая функция	316
33.1. Гипотеза де Бройля и ее экспериментальное подтверждение	316
33.2. Свойства волн де Бройля	318
33.3. Волны де Бройля и квантовые условия Бора. Частицы, проявляющие волновые свойства	319
33.4. Вероятность местонахождения микрочастицы. Волновая функция	320
33.5. Соотношение неопределенностей для координаты и импульса	323

33.6. Соотношение неопределенностей для времени и энергии. Принцип соответствия	324
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	326
<i>Задача с решением</i>	326
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	327
Глава 34. Уравнение Шредингера	328
34.1. Уравнение Шредингера для свободной частицы	328
34.2. Общее уравнение Шредингера.....	329
34.3. Стационарное уравнение Шредингера.....	330
34.4. Уравнения Шредингера в операторной форме. Оператор Гамильтона	331
34.5. Связь классической и квантовой механики. Теорема Эренфеста.....	332
34.6. Решение уравнения Шредингера для свободной частицы	333
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	333
<i>Задача с решением</i>	333
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	334
Глава 35. Потенциальный ящик и потенциальный барьер	335
35.1. Потенциальный ящик.....	335
35.2. Потенциальный барьер бесконечной ширины. Уравнение Шредингера и его решение для случаев $E < U$, $E > U$	338
35.3. Потенциальный барьер конечной ширины. Случаи $E > U$, $E < U$	342
35.4. Туннельный эффект. Коэффициенты прозрачности и отражения.....	344
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	346
<i>Задача с решением</i>	346
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	346
Глава 36. Гармонический осциллятор.....	347
36.1. Потенциальная яма	347
36.2. Исходная классическая теория гармонического осциллятора.....	348
36.3. Квантовая теория гармонического осциллятора	350
36.4. Волновые функции и энергетические уровни квантового осциллятора	352
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	353
<i>Задача с решением</i>	353
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	354
Глава 37. Квантовая теория водородоподобного атома	355
37.1. Уравнение Шредингера для электрона в водородоподобном атоме	355
37.2. Квантовые числа. Возбужденные состояния электрона в водородоподобном атоме и спектры.....	356
37.3. Спин электрона. Кратность вырождения уровней водородоподобных атомов	358
37.4. $1s$ -состояние атома водорода.....	359
37.5. Спин-орбитальное взаимодействие. Эффекты Зеемана и Штарка	360
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	361
<i>Задача с решением</i>	361
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	361
Глава 38. Квантовая теория многоэлектронных атомов.....	362
38.1. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны	362
38.2. Принцип Паули	363
38.3. Строение многоэлектронных атомов	364
38.4. Рентгеновские спектры	366

<i>Контрольные вопросы и задания</i>	367
<i>Задача с решением</i>	367
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	368
Глава 39. Квантовая теория молекул	369
39.1. Гетерополярная и гомеополярная связи. Обменное взаимодействие.....	369
39.2. Образование молекул	370
39.3. Колебательная и вращательная энергии молекул.....	371
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	373
<i>Задача с решением</i>	373
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	374
Глава 40. Элементы физики твердого тела	375
40.1. Качественное обоснование зонной теории	375
40.2. Уравнение Шредингера для кристаллов. Теорема Блоха и туннелирование	376
40.3. Решение уравнения Шредингера в приближении слабой связи	377
40.4. Зоны Бриллюэна и эффективная масса электрона.....	379
40.5. Приближение сильной связи	381
40.6. Металлы, диэлектрики, полупроводники по зонной теории	382
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	383
<i>Задача с решением</i>	383
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	384
Глава 41. Строение атомного ядра. Радиоактивность	385
41.1. Заряд, масса, радиус, спин, квантовый характер ядра	385
41.2. Удельная энергия связи ядер разных элементов. Модели ядра	387
41.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада	389
41.4. α -распад, β -распад. Нейтрино.....	390
41.5. γ -излучение и его свойства	392
41.6. Искусственная радиоактивность.....	394
41.7. Регистрация и дозы радиоактивных излучений	396
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	397
<i>Задача с решением</i>	398
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	398
Глава 42. Современная физическая картина мира	399
42.1. Космические лучи	399
42.2. Четыре вида фундаментальных взаимодействий.....	400
42.3. Элементарные и фундаментальные частицы. Кварки	402
42.4. Эволюция Вселенной	403
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	404
<i>Задача с решением</i>	404
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	405
Список литературы	406
Физические константы и величины	407
Предметный указатель	408

Предисловие

Физика является наиболее блестящим достижением человеческой научной мысли. По стечению обстоятельств — благодаря гонке вооружений XX в. — эту сверхнауку создавало такое мощное сочетание сил и умов, которое не было достижимо до описываемых событий и едва ли может быть повторено в будущем. Так, концентрация сравнимых сил в технологиях начала XXI в. не сопровождается концентрацией сравнимого интеллектуального потенциала и едва ли может привести к созданию столь же красивой интеллектуальной аналитической науки. Объясняется это появлением мощных компьютеров, которые заменили изящные аналитические формулы и качественные рассуждения полуэмпирическими компьютерными расчетами. Тем не менее человек учится, чтобы понимать себя и окружающий мир. И до сих пор физика помогает этому лучше, чем менее аналитические специальные науки.

Физику принято называть *экспериментальной* наукой. И действительно, она базируется на огромном количестве замечательных опытов и экспериментов. Однако не менее важно, что физика — наука *аналитическая* (*теоретическая*). Именно в физике создан уникальный аппарат, позволяющий анализировать причины, связи, механизмы и последствия самых разных явлений в самых разных жизненных сферах. На протяжении многих столетий физика была (и еще будет) локомотивом, мчащимся впереди человечества и освещающим ему путь. Это одна из причин, почему всем надо знать физику. Поэтому в данном курсе особое внимание уделено аналитическому аппарату физики.

Данная книга разбита на три раздела примерно равного объема и содержит 42 главы. Раздел I «Механика и молекулярная физика» включает главы, посвященные классической механике (1–4), колебаниям и волнам (5–7), релятивистской механике (8), статистической физике (9–10), физической кинетике (11) и термодинамике (12–14). Раздел II «Электродинамика и волновая оптика» содержит главы, посвященные электрическим и магнитным явлениям (15–25), а также геометрической и волновой оптике (26–29). Раздел III «Квантовая физика» включает квантовую оптику (30) и квантовую теорию излучения (31), атомную (32–40) и ядерную (41) физику, а также дает представление о современной физической картине мира (42).

Курс является компактным, но при этом дает цельное представление об основных законах и понятиях современной физики, их взаимосвязи и происхождении. Ключевые определения и термины выделены курсивом, названия основных законов и теорем выделены жирным шрифтом.

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать

- основные законы классической механики, теории колебаний и волн, релятивистской механики, статистической физики, физической кинетики и термодинамики, электрических и магнитных явлений, геометрической

и волновой оптики, квантовой оптики, квантовой теории излучения, атомной и ядерной физики;

- современную физическую картину мира;
- физические явления и эффекты, используемые в технике и других наукоёмких сферах деятельности человека;

уметь

- на основе законов механики описывать основные виды движения тел;
- строить математические модели физических явлений и процессов;
- решать типовые прикладные физические задачи;
- применять основные законы общей физики при решении практических задач;

владеть

- навыками использования стандартных методов и моделей математического анализа применительно к решению прикладных физических задач;
- навыками использования методов аналитической геометрии и векторной алгебры в смежных дисциплинах и физике;
- методами теоретического исследования физических явлений и процессов;
- навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов.

Полученные компетенции окажутся необходимы для успешного изучения в дальнейшем следующих дисциплин:

- теоретическая механика;
- прикладные задачи математической физики;
- прикладная механика;
- электротехника;
- электронная техника;
- медицинская физика;
- биологическая физика;
- экология;
- геофизика;
- теоретическая физика.

Курс предназначен для студентов академического бакалавриата широкого круга вузов с изучением общей физики в течение 1—4-го семестров, а также для самоподготовки и повторения ранее изученного материала. Может быть использован также преподавателями для самообразования и подготовки к занятиям.

С замечаниями и пожеланиями к автору можно обратиться по адресу: n@wswr.ru

Раздел I

**МЕХАНИКА
И МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА**



Глава 1

КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- предмет изучения кинематики материальной точки;
- определения поступательного и вращательного движения, перемещения и пройденного пути, скорости, тангенциального, нормального и полного ускорений;

уметь

- на основе законов кинематики описывать прямолинейное равномерное движение; прямолинейное равнопеременное движение; прямолинейное движение с переменным ускорением; равномерное движение по окружности; равнопеременное движение по окружности; равномерное криволинейное движение;

- решать типовые прикладные физические задачи по кинематике;

- применять основные законы кинематики при решении практических задач;

владеть

- навыками использования стандартных методов и моделей математического анализа (в первую очередь дифференциального и интегрального исчисления) применительно к решению прикладных физических задач по кинематике;

- навыками использования методов аналитической геометрии и векторной алгебры (в первую очередь работы с векторными и скалярными величинами) в кинематике;

- навыками проведения физического эксперимента по кинематике и обработки его результатов.
-

1.1. Механика и ее структура. Материальная точка и твердое тело

Физика — наука, изучающая общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы ее движения. *Механика* — часть физики, изучающая законы движения и равновесия тел.

Под механикой часто подразумевают *классическую механику*, созданную Исааком Ньютоном (1643—1727) для описания движения макроскопических тел. Тем не менее в механику входят еще два важнейших раздела — релятивистская механика и квантовая физика (квантовая механика).

Релятивистская механика рассматривает движение тел при скоростях, сравнимых со скоростью света. Создание релятивистской механики связывают с именами Анри Пуанкаре и Альберта Эйнштейна.

Для описания движения микроскопических тел (например, электронов и атомов) законы классической механики тоже не всегда применимы — они заменяются законами *квантовой физики*. Формулирование основных положений квантовой физики выполнено Максом Планком, Луи де Бройлем, Эрвином Шредингером. Квантовая физика — важнейшая часть современной физики — изучается отдельно в разд. III данного учебника.

Создание классической физики и механики по праву связывают с именем И. Ньютона, который сформулировал основополагающие законы физики практически в том виде, в каком мы сегодня ими пользуемся. Новая картина мира и математическое описание космических тел изложены этим величайшим ученым в трех книгах под общим названием «Математические начала натуральной философии» и опубликованы с 1679 по 1687 г. Ньютон ввел силу тяготения, определяемую массами взаимодействующих тел, и показал, что планеты движутся под действием этой силы по эллиптическим траекториям. Параллельно с Готфридом Вильгельмом Лейбницем он создал основы дифференциальной геометрии и применил эти основы для анализа бесконечно малых величин. Исаак Ньютон помимо физики и математики внес свой вклад и в другие науки — в частности, в создание научных основ хронологии.

Механика делится на три раздела: кинематику, динамику и статику. *Кинематика* изучает движение тел, не рассматривая причин этого движения. *Динамика* изучает законы движения тел и причины этого движения. *Статика* изучает законы равновесия тела или системы тел. Зная законы движения тел, можно установить и законы равновесия.

Механика описывает движение реальных тел с помощью ряда абстракций, упрощающих решение задач. Среди них понятия материальной точки и абсолютно твердого тела. *Материальная точка* — тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. Например, изучая движение планеты по орбите вокруг Солнца, обычно можно принять ее за материальную точку. Но планету нельзя считать точкой, если мы рассматриваем перемещение по ней автомобиля.

Произвольное макроскопическое тело можно разбить на малые взаимодействующие между собой части, каждая из которых рассматривается как материальная точка со своей массой. Тогда изучение движения тел сводится к изучению системы материальных точек. В механике часто сначала изучают движение отдельных точек, а затем переходят к изучению движения тел.

Еще одна модель — абсолютно твердое тело. *Абсолютно твердым телом* называется тело, взаимное положение любых точек которого не изменяется, в каких бы процессах оно ни участвовало (недеформируемое тело). Иногда слово «абсолютно» опускают и говорят просто о *твердом теле*.

1.2. Перемещение и пройденный путь

Можно показать, что любое движение абсолютно твердого тела представимо как комбинация поступательного и вращательного движений. *Поступательное движение* — это движение, при котором любой выделенный в теле отрезок остается параллельным самому себе. *Вращательное движение* — это движение, при котором точки тела описывают окружности, расположенные в параллельных плоскостях с центрами на прямой, называемой осью вращения. При этом ось вращения в процессе движения может менять свое положение.

Движение тел происходит в пространстве и во времени. Для определения положения материальной точки требуется задать систему отсчета. *Система отсчета* — совокупность системы координат и часов, связанных с телом,

относительно которого рассматривается движение. В прямоугольной декартовой системе координат, используемой наиболее часто, положение точки в данный момент времени определяется тремя координатами x , y и z или *радиус-вектором* \vec{r} , проведенным из начала системы координат в данную точку (рис. 1.1). Здесь и далее стрелка над символом означает, что он является вектором. В общем случае координаты движения являются функцией времени:

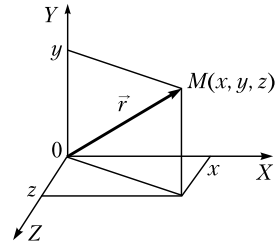


Рис. 1.1

$$x = f_x(t), \quad y = f_y(t), \quad z = f_z(t), \quad (1.1)$$

или, в векторном виде, зависимостью радиус-вектора положения точки (тела) от времени:

$$\vec{r} = \vec{f}(t). \quad (1.2)$$

Эти уравнения называют *кинематическими уравнениями движения* точки.

При движении в пространстве точка описывает кривую, называемую *траекторией движения*. Эта кривая, очевидно, описывается уравнениями (1.1) и (1.2). В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным. Длина траектории, пройденной материальной точкой, называется *пройденным путем* S . Вектор $\Delta\vec{r}$, соединяющий начальное \vec{r}_1 и конечное \vec{r}_2 положения движущейся точки (рис. 1.2), называется *перемещением*:

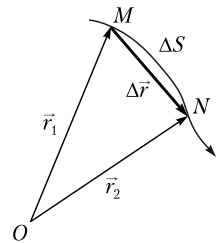


Рис. 1.2

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (1.3)$$

При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с проходимым участком траектории и модуль перемещения равен пройденному пути.

1.3. Скорость, ускорение

Скорость иногда определяют как путь в единицу времени или просто путь, деленный на время:

$$v = \frac{S}{t}.$$

Такое определение неплохо работает, когда скорость постоянна и под скоростью подразумевают ее модуль.

Если скорость меняется со временем, то можно определить *среднюю скорость* как приращение пути ΔS за данный отрезок времени Δt :

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Если устремить длину отрезка времени к нулю, то получим в пределе *мгновенную скорость* $v_{\text{мгн}}$. При этом предел отношения приращения пути к бесконечно малому приращению времени в соответствии с математическим определением является производной от пути по времени:

$$v_{\text{мгн}} = \frac{dS}{dt}.$$

Как известно, производная характеризует быстроту изменения функции — в данном случае пройденного пути. По геометрическому смыслу производной функции скорость равна тангенсу угла (угловому коэффициенту) наклона касательной к графику зависимости пути от времени в данный момент времени.

До сих пор, очевидно, речь шла о модуле скорости. Однако скорость является вектором, поскольку характеризуется не только величиной, но и направлением. Поэтому необходимо дать строгое определение скорости как векторной величины.

Скорость — векторная величина, характеризующая быстроту движения и направление движения материальной точки. Математически она задается пределом отношения вектора перемещения к интервалу времени или производной радиус-вектора по времени:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (1.4)$$

Так как в пределе при малом интервале времени хорда стремится к касательной (см. рис. 1.2), то вектор скорости направлен по касательной к траектории движения.

При малом интервале времени $|d\vec{r}| = dS$, поэтому модуль скорости похожим образом выражается как через модуль приращения радиус-вектора, так и через приращение пути:

$$v = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{dS}{dt}. \quad (1.5)$$

Отсюда путь можно выразить через модуль скорости интегралом

$$S = \int_0^t v dt. \quad (1.6)$$

При равномерном движении модуль скорости является константой и может быть вынесен из-под знака интеграла. В результате получим известную формулу

$$S = vt. \quad (1.7)$$

Проекции уравнения (1.4) на координаты дают проекции скорости:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (1.8)$$

Быстроту изменения скорости (в частности, модуля скорости и направления движения) определяет *ускорение* \vec{a} . По аналогии с формулой (1.4) ускорение можно задать уравнениями

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (1.9)$$

Эти уравнения могут быть проинтегрированы в векторном виде либо скалярно. В частности, скорость в одномерном случае связана с ускорением зависимостью

$$dv = a dt. \quad (1.10)$$

Например, для равноускоренного движения интегрирование зависимости (1.10) с учетом равенства (1.6) позволяет в одномерном случае вывести известные уравнения зависимости скорости v и пути S от времени t , начальной скорости v_0 и ускорения a :

$$v = v_0 + at; \quad (1.11)$$

$$S = v_0 t + at^2/2. \quad (1.12)$$

1.4. Тангенциальное, нормальное и полное ускорения

Сделаем геометрическое построение (рис. 1.3), позволяющее понять суть и рассчитать величину тангенциального и нормального ускорений. Пусть точка движется по кривой с произвольным ускорением. В соответствии с рис. 1.3 начальная скорость $\vec{v}_1 = \overline{MA}$, через время Δt она равна $\vec{v} = \overline{CE}$. Разложим вектор приращения скорости $\Delta\vec{v} = \overline{AD}$ на две составляющие — вдоль направления скорости (тангенциальная составляющая $\Delta v_\tau = \overline{BD}$) и перпендикулярно (нормальная, или центростремительная, составляющая $\Delta v_n = \overline{AB}$). В пределе получим, что тангенциальная составляющая ускорения a_τ равна производной от модуля скорости:

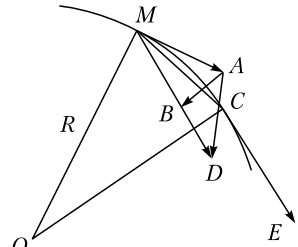


Рис. 1.3

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}. \quad (1.13)$$

При малом промежутке времени траекторию можно считать дугой окружности радиуса R с центром в точке O (см. рис. 1.3). Из подобия треугольников ABM и MCO (в пределе малого времени стороны малых углов равнобедренных треугольников ABM и MCO взаимно перпендикулярны) отношение нормальной составляющей приращения скорости Δv_n к начальной скорости v_1 примерно равно отношению перемещения $v\Delta t = \overline{MC}$ к радиусу R :

$$\frac{\Delta v_n}{v_1} = \frac{v\Delta t}{R}. \quad (1.14)$$

При малом промежутке времени $v_1 \approx v$ и нормальное ускорение a_n выражается из равенства (1.14) известной изучавшим движение по окружности формулой

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.15)$$

Полное ускорение тела можно найти как геометрическую сумму тангенциальной и нормальной составляющих (см. рис. 1.3), а его модуль — по теореме Пифагора:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.16)$$

В зависимости от соотношения тангенциальной и нормальной составляющих ускорения различают:

- прямолинейное равномерное движение;
- прямолинейное равнопеременное движение;

- прямолинейное движение с переменным ускорением;
- равномерное движение по окружности;
- равнопеременное движение по окружности;
- равномерное криволинейное движение;
- криволинейное равнопеременное движение;
- криволинейное движение с переменным ускорением.

В заключение главы напомним, что в международной системе единиц СИ время измеряется в секундах (с), расстояние — в метрах (м), скорость — в метрах в секунду (м/с), ускорение — в метрах в секунду в квадрате (м/с²).

Контрольные вопросы и задания

- 1.1. Определите предмет изучения физики и механики.
- 1.2. Определите предмет изучения кинематики, динамики и статики.
- 1.3. Приведите примеры, когда можно и когда нельзя считать человека материальной точкой.
- 1.4. Звук в твердом теле распространяется как продвижение деформации слоя атомов. Какой должна быть скорость звука в абсолютно твердом теле? Почему абстракция абсолютно твердого тела противоречит релятивистской механике, постулирующей ограниченность максимальной скорости сигнала скоростью света в вакууме?
- 1.5. Перечислите отличия перемещения от пройденного пути.
- 1.6. Перечислите примеры, когда модуль перемещения равен пройденному пути.
- 1.7. Почему в физике не принято определять скорость как путь, пройденный за определенное время?
- 1.8. Приведите примеры, когда направление ускорения совпадает и не совпадает с направлением скорости.
- 1.9. Охарактеризуйте тангенциальное, нормальное и полное ускорения при различных указанных в главе видах движения.

Задачи с решениями

- 1.1. Точка движется в плоскости по закону (система СИ):

$$\begin{cases} x = t + 1, \\ y = (t + 1)t. \end{cases}$$

Найдем уравнение траектории и модуль скорости при $t = 3$ с.

Решение

Для получения траектории выразим из первого уравнения время: $t = x - 1$ и подставим его во второе уравнение: $y = x(x - 1)$ — искомая траектория (парабола).

Проекции скорости на координаты находим как производные от координат:

$$v_x = 1; v_y = 2t + 1.$$

Модуль скорости находим по теореме Пифагора через проекции скорости на координаты:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 4t^2 + 4t + 2.$$

Модуль скорости при $t = 3$ с равен $v = \sqrt{50} \approx 7,1$ м/с.

- 1.2. Координата тела, выраженная в метрах, зависит от времени, выраженного в секундах, по закону $x = 2\cos 2t$. Найдем максимальное ускорение тела.

Решение

Ускорение равно второй производной от координаты по времени. Поскольку

$$x' = (2 \cos 2t)' = -4 \sin 2t,$$

то получим для ускорения

$$a = x'' = (-4 \sin 2t)' = -8 \cos 2t.$$

Значение косинуса лежит в пределах от -1 до 1 . Поэтому, очевидно, максимальное ускорение тела равно 8 м/с^2 .

1.3. Тело запущено с поверхности земли вертикально вверх так, что за время $t = 12 \text{ с}$ оно прошло путь $S = 400 \text{ м}$. Чему равна его начальная скорость?

Решение

Для того чтобы тело двигалось вверх время $t_1 = 12 \text{ с}$, необходимо, чтобы его начальная скорость равнялась $V = gt_1 = 120 \text{ м/с}$. Тогда высота подъема составит

$$S_1 = V^2/(2g) = 720 \text{ м},$$

что превышает требуемые 400 м . Следовательно, начальная скорость меньше, а искомый путь достигается на участке полета, на котором тело движется вниз.

В связи с этим главной проблемой задачи является то, что требуется найти не перемещение, а путь, равный сумме модулей перемещений вверх и вниз.

Время перемещения вверх равно $t_1 = V/g$.

Время перемещения вниз t_2 связано с перемещением вниз S_2 :

$$S_2 = gt_2^2/2 = S - S_1 = S - V^2/(2g).$$

Выразив из данного уравнения t_2 , из условия $t_1 + t_2 = t$ получим квадратное уравнение относительно V :

$$V^2 - gtV + g^2t^2/2 - gS.$$

Это уравнение для заданных условий имеет два решения:

$$V = \frac{gt \pm \sqrt{4gS - g^2t^2}}{2}.$$

При знаке «минус» и начальной скорости 40 м/с получается сначала движение вверх на 80 м , а затем движение вниз на 320 м , т.е. тело уйдет под землю, что не рассматривается. Таким образом, искомая начальная скорость определяется решением

$$V = \frac{gt + \sqrt{4gS - g^2t^2}}{2}$$

и равна 80 м/с .

1.4. Два тела брошены из одной точки вверх с одинаковой скоростью 20 м/с с интервалом времени 5 с . Через какой интервал времени после бросания первого тела они встретятся вновь?

Решение

Время в полете брошенного вертикально вверх тела равно $t = 2v_0/g = 4 \text{ с}$, что меньше интервала времени между началом движения первого и второго тел. Следовательно, встреча тел произойдет еще до того, как начнет движение второе тело, т.е. искомый интервал равен $t = 4 \text{ с}$.

1.5. Два тела брошены из одной точки вверх с одинаковой скоростью 20 м/с с интервалом времени 2 с . Через какой интервал времени после бросания второго тела они встретятся вновь?

Решение

Для равноускоренного движения с направленной вверх начальной скоростью v_0

$$h_1 = v_0t_1 - gt_1^2/2; \quad h_1 = v_0t_2 - gt_2^2/2; \quad t_1 = t_2 + \tau,$$

где τ — интервал времени между началом движения первого и второго тел.

Условие встречи тел $h_1 = h_2 \Rightarrow$

$$v_0(t_2 + \tau) - g(t_2 + \tau)^2/2 = v_0 t_2 - g t_2^2/2.$$

Раскрывая скобки и приводя подобные члены, получим уравнение

$$g t_2 \tau = v_0 \tau - g t_2^2/2,$$

откуда искомый интервал времени после бросания второго тела до встречи равен

$$t_2 = v_0/g - \tau/2 = 1 \text{ с.}$$

1.6. Тело падает с высоты h . Разделим эту высоту на три отрезка так, чтобы на прохождение каждого из них потребовалось одинаковое время.

Решение

Полное время падения с высоты h равно $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

Тогда время пролета первого искомого отрезка равно $t_1 = \frac{t}{3} = \frac{\sqrt{2h/g}}{3}$, что дает для первого искомого отрезка $h_1 = g t_1^2/2 = h/9$.

Время пролета первого и второго отрезков равно $t_{12} = \frac{2t}{3} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2h}{g}}$, откуда длина первых двух отрезков равна $h_{12} = g t_{12}^2/2 = 4h/9$. Следовательно, длина второго искомого отрезка равна $h_2 = h_{12} - h_1 = h/3$.

Таким образом, длина третьего искомого отрезка равна $h_3 = h - h_{12} = 5h/9$.

1.7. Тело, брошенное с начальной скоростью $v_0 = 2$ м/с вниз под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, упруго ударяется о параллельные стенки колодца. Глубина колодца $h = 10$ м, расстояние между стенками колодца $l = 1$ м. Сколько раз тело ударится во время падения о стенки колодца?

Решение

Время падения t находится из уравнения для равноускоренного движения по вертикали

$$0 = h - v_0 \sin t - g t^2/2,$$

откуда положительное решение квадратного уравнения дает

$$t = (-2v_0 \sin \alpha + \sqrt{4v_0^2 \sin^2 \alpha + 8gh})/g.$$

Время полета тела от одной стенки до другой τ определяется горизонтальной составляющей скорости $\tau = l/(v_0 \cos \alpha)$.

Количество раз n , которое тело ударится о стенки колодца, равно целой части числа t/τ :

$$t/\tau = (-2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha + v_0 \cos \alpha \sqrt{4v_0^2 \sin^2 \alpha + 8gh})/(gl) = 4,6.$$

Извлечение целой части дает $n = 4$.

1.8. При движении колонны автомобилей с достаточно высокой скоростью V комки грязи с колес автомобиля могут попасть в следующую за ним машину. Чему равна безопасная дистанция между автомобилями?

Решение

Удобно перейти в систему координат, связанную с кузовами автомобилей. В этой системе сами автомобили неподвижны и лишь их колеса совершают вращательные движения. При этом линейная скорость края колеса (и отрывающегося от

этого края комка грязи) равна V , однако в каждой точке имеет свое направление. В соответствии с применимой в этой инерциальной системе теорией движения тела, брошенного под углом к горизонту, максимальная дальность достигается при угле 45° . Горизонтальная дальность полета комка определяется произведением горизонтальной составляющей скорости и времени полета комка, которое, в свою очередь, определяется вертикальной составляющей скорости. В результате безопасная дистанция должна составлять не менее горизонтальной дальности полета комка V^2/g . Следует отметить, что при достаточно большой скорости горизонтальная и вертикальная дальности полета комка достаточно велики, так что расстояниями порядка радиуса колеса можно пренебречь.

Задачи для самостоятельного решения

- 1.9.** Точка движется в плоскости по закону (система СИ) $x = t - 2, y = \sin(\pi t/2)$. Найдите уравнение траектории и модуль ускорения при $t = 1$ с.
- 1.10.** Тело движется в плоскости по закону (система СИ) $x = (t + 1)t, y = (t - 2)t$. Найдите тангенциальное ускорение при $t = 4$ с.
- 1.11.** Точка движется в плоскости по закону (система СИ) $x = t - 3, y = (t - 1)t$. Найдите уравнение траектории и тангенциальное ускорение при $t = 3$ с.
- 1.12.** Точка движется в плоскости по закону (система СИ) $x = t + 1, y = \sin(\pi t/6)$. Найдите модули скорости и ускорения при $t = 3$ с.
- 1.13.** Тело движется в плоскости по закону (система СИ) $x = (t + 1)(t + 1)t, y = (t - 2)(t - 1)t$. Найдите нормальное ускорение при $t = 2$ с.
- 1.14.** Зависимость пройденного пути от времени задается уравнением $S = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $C = 0,1$ м/с² и $D = 0,2$ м/с³. Через какое время t после начала движения тело будет иметь ускорение $a = 1$ м/с²?
- 1.15.** Точка движется по окружности радиусом $R = 3$ см. Зависимость пути от времени дается уравнением $S = Ct^3$, где $C = 0,1$ см/с³. Найдите нормальное и тангенциальное ускорения точки в момент, когда линейная скорость точки $v = 0,2$ м/с.
- 1.16.** Камень брошен горизонтально со скоростью 10 м/с. Найдите радиус кривизны R траектории камня через время $t = 2$ с после начала движения.
- 1.17.** Свободно падающее тело в последнюю секунду своего движения проходит треть всего пути. С какой высоты падает тело и каково время его падения?
- 1.18.** Человек может бросить камень со скоростью v . Под каким углом к горизонту надо бросать камень, чтобы дальность броска по горизонтали была максимальной? Сопротивлением воздуха и высотой бросания пренебречь.
- 1.19.** Человек может бросить камень со скоростью 10 м/с. Высота бросания составляет 2 м. Под каким углом к горизонту надо бросать камень, чтобы дальность броска по горизонтали была максимальной? Сопротивлением воздуха пренебречь.
- 1.20.** Тело падает с высоты, причем его начальная скорость равна нулю. За последние две секунды падения оно пролетело $2/3$ полного пути. Чему равно полное время падения?
- 1.21.** Шарик, брошенный под углом к горизонту 15° со скоростью 20 м/с, упруго отразился от вертикальной стенки так, что вернулся в точку бросания. Чему равно расстояние от точки бросания до стенки?
- 1.22.** Тело движется прямолинейно, причем координата пропорциональна кубу времени. Какой степени времени пропорционально ускорение?
- 1.23.** Тело движется прямолинейно, причем координата обратно пропорциональна времени: $x = c_1/t$. Какой степени времени пропорциональна скорость?
- 1.24.** Тело движется прямолинейно, причем график зависимости скорости от времени задается четвертью окружности $v^2 + t^2 = 4$, где скорость изменяется от 2 до 0 м/с, а время — от 0 до 2 с. Чему равен путь, пройденный телом за эти две секунды?

1.25. Катер, имеющий скорость v , совершил две поездки длительностью t_1 и t_2 из точки A в точку B , расположенные на расстоянии S , и обратно. Первая поездка совершена по реке, имеющей скорость течения u , а вторая — по озеру. Найдите отношение t_2/t_1 .

1.26. Катер совершил две поездки из точки A в точку B , расположенные на расстоянии S , и обратно. Первая поездка совершена по реке, а вторая — по озеру. Время одной из поездок оказалось на треть больше времени другой поездки. Найдите отношение скорости катера к скорости реки.

1.27. Автомобиль с колесами радиуса R движется со скоростью V . От колеса вверх отбрасываются комки грязи. На какую максимальную высоту над дорогой может подняться комок? Размером колеса по сравнению с высотой подъема комка пренебречь.

Глава 2

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- предмет изучения динамики материальной точки;
- суть первого закона Ньютона и понятия инерциальной системы отсчета;
- суть второго закона Ньютона как основного закона динамики поступательно-го движения, да и всей физики;
- определения массы и силы;
- суть третьего закона Ньютона и его применения для описания системы тел;
- закон сохранения импульса и его связь с законами Ньютона;

уметь

- на основе законов Ньютона описывать поступательное движение тела и системы тел;
- на основе второго закона Ньютона описывать поступательное движение тела в неинерциальных системах отсчета;
- решать типовые прикладные физические задачи по динамике;
- применять законы Ньютона и закон сохранения импульса при решении практических задач;

владеть

- навыками использования стандартных методов и моделей математического анализа (в первую очередь дифференциального и интегрального исчисления) применительно к решению прикладных физических задач по динамике;
 - навыками использования методов аналитической геометрии и векторной алгебры (в первую очередь работы с векторными и скалярными величинами) в динамике;
 - навыками проведения физического эксперимента по динамике и обработки его результатов.
-

2.1. Первый закон Ньютона

Законы Ньютона (как и другие физические законы) являются обобщением человеческого опыта.

Первый закон Ньютона: *существуют системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых любая изолированная от внешних воздействий материальная точка либо покоится, либо сохраняет состояние равномерного прямолинейного движения.*

Стремление тела сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется *инерцией*. Поэтому первый закон Ньютона иногда называют законом инерции. По сути этот закон в неявном виде указывает на инерцию, связанную с массой тел, при отсутствии воздействия (силы). Поэтому иногда формулируют его в следующем виде: скорость те-