

УЧЕБНИК ДЛѦ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Н. П. Калашников, М. А. Смондырев

# ОСНОВЫ ФИЗИКИ

## Том 1

2-Е ИЗДАНИЕ, ЭЛЕКТРОННОЕ



Москва  
Лаборатория знаний  
2021

УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73  
К17

*Серия основана в 2009 г.*

**Калашников Н. П.**

**К17** Основы физики : в 3 т. Т. 1 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — 2-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2021. — 545 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-073-9 (Т. 1)  
ISBN 978-5-00101-072-2

Учебник соответствует программе дисциплины «Физика» для естественнонаучных и технических университетов. Два его тома входят в состав учебного комплекта, включающего также учебное пособие «Основы физики. Упражнения и задачи» тех же авторов.

Во многих отношениях данный учебник не имеет аналогов. Ряд оригинальных методических приемов и способов изложения материала, включение новых, зачастую неожиданных тем и ярких примеров, отсутствующих в традиционных курсах физики, позволяют учащимся приобрести навыки уверенного самостоятельного мышления, глубже понять физические основы самых различных природных явлений, делать практические, качественные оценки, оперируя размерностями и порядками величин.

Для студентов естественнонаучных и инженерно-технических специальностей.

**УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73**

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Основы физики : в 3 т. Т. 1 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — М. : Лаборатория знаний, 2017. — 542 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-00101-004-3 (Т. 1); ISBN 978-5-00101-003-6.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-073-9 (Т. 1)  
ISBN 978-5-00101-072-2

© Лаборатория знаний, 2017

# Оглавление

От издательства . . . . .	3
<b>Часть I Физические основы механики</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1 Измерения физических величин</b>	<b>7</b>
1.1 О разнице вопросов «как?» и «почему?» . . . . .	7
1.2 Единицы измерения . . . . .	9
1.3 Анализ размерностей . . . . .	12
1.4 Система отсчета . . . . .	16
1.5 Алгебра векторов . . . . .	17
Контрольные вопросы . . . . .	21
<b>Глава 2 Кинематика материальной точки</b>	<b>23</b>
2.1 Абстракция в механике . . . . .	23
2.2 Перемещение . . . . .	24
2.3 Скорость . . . . .	26
2.4 Вычисление пройденного пути и перемещения . . . . .	28
2.5 Ускорение . . . . .	30
2.6 Ускорение при криволинейном движении . . . . .	31
2.7 Движение тела, брошенного под углом к горизонту . . . . .	34
2.8 Вращение абсолютно твердого тела . . . . .	40
Угловая скорость, угловое ускорение . . . . .	41
Связь угловых и линейных скоростей и ускорений . . . . .	43
Связь между векторами $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$ . . . . .	44
Контрольные вопросы . . . . .	45
<b>Глава 3 Динамика материальной точки</b>	<b>47</b>
3.1 Принцип инерции Галилея и первый закон Ньютона . . . . .	47
3.2 Второй и третий законы Ньютона . . . . .	48
3.3 Механические силы . . . . .	54
Сила тяжести и вес . . . . .	54
Сила упругости . . . . .	55
Сила трения . . . . .	57
Сила сопротивления среды . . . . .	58

3.4	Движение тела, брошенного под углом к горизонту в среде с сопротивлением . . . . .	61
3.5	Закон сохранения импульса . . . . .	63
3.6	Центр масс . . . . .	65
3.7	Инерциальные системы отсчета и принцип относительности Галилея . . . . .	67
3.8	Уравнение Мещерского . . . . .	69
	Контрольные вопросы . . . . .	73
<b>Глава 4</b>	<b>Работа и энергия</b>	<b>75</b>
4.1	Работа силы . . . . .	75
4.2	Кинетическая энергия . . . . .	78
4.3	Мощность . . . . .	79
4.4	Потенциальная энергия . . . . .	81
	Векторный анализ: скалярное поле . . . . .	83
	Потенциальное поле сил . . . . .	85
	Консервативные силы . . . . .	86
	Постоянное однородное поле сил тяжести . . . . .	88
	Поле центральных сил . . . . .	89
4.5	Закон сохранения энергии . . . . .	90
4.6	Условия равновесия механической системы . . . . .	93
4.7	Примеры применения законов сохранения . . . . .	95
	Абсолютно неупругое столкновение двух шаров . . . . .	96
	Абсолютно упругое столкновение двух шаров . . . . .	97
	Абсолютно упругое отражение шара от движущейся стенки . . . . .	98
	Контрольные вопросы . . . . .	101
<b>Глава 5</b>	<b>Динамика твердого тела</b>	<b>103</b>
5.1	Закон сохранения момента импульса . . . . .	103
5.2	Динамика вращения вокруг неподвижной оси . . . . .	106
	Уравнение движения . . . . .	107
	Момент инерции . . . . .	109
	Теорема Штейнера . . . . .	111
5.3	Работа внешних сил при вращении твердого тела . . . . .	114
5.4	Плоское движение твердого тела . . . . .	115
5.5	О принципе работы колеса . . . . .	122
	Передвижение груза с помощью катка . . . . .	122
	Качественное рассмотрение работы колеса . . . . .	124
	Количественная теория колеса . . . . .	125
5.6	Гироскопы . . . . .	127
	Факты о гироскопах . . . . .	127
	Элементарная теория гироскопа . . . . .	128
	Гироскопический эффект и гироскопические силы . . . . .	131
	Контрольные вопросы . . . . .	135

<b>Глава 6</b>	<b>Закон всемирного тяготения</b>	<b>137</b>
6.1	Законы Кеплера . . . . .	137
6.2	Гравитационные силы . . . . .	139
6.3	Характерные астрономические масштабы . . . . .	139
6.4	Принцип эквивалентности масс . . . . .	142
6.5	Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия . . .	143
6.6	Космические скорости . . . . .	144
	«Темные звезды» Джона Мичелла . . . . .	146
6.7	Гравитационный маневр . . . . .	146
	Контрольные вопросы . . . . .	150
<b>Глава 7</b>	<b>Неинерциальные системы отсчета</b>	<b>151</b>
7.1	Силы инерции . . . . .	151
7.2	Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета . . . . .	152
7.3	Центробежная сила инерции . . . . .	153
7.4	Сила Кориолиса . . . . .	155
	Контрольные вопросы . . . . .	158
<b>Глава 8</b>	<b>Элементы механики жидкостей и газов</b>	<b>159</b>
8.1	Закон Паскаля . . . . .	159
8.2	Закон Архимеда . . . . .	163
8.3	Уравнение непрерывности . . . . .	165
8.4	Уравнение Бернулли . . . . .	167
8.5	Движение тел в среде с сопротивлением . . . . .	170
	Уравнения движения . . . . .	170
	Число Рейнольдса . . . . .	171
	Коэффициент сопротивления . . . . .	173
	Контрольные вопросы . . . . .	175
<b>Глава 9</b>	<b>Элементы специальной теории относительности</b>	<b>177</b>
9.1	Анализ преобразований Галилея . . . . .	177
9.2	Опыт Майкельсона—Морли . . . . .	179
9.3	Преобразования Лоренца . . . . .	181
9.4	Постулаты Эйнштейна. Некоторые эффекты специальной теории относительности . . . . .	183
	Инвариантность интервала . . . . .	184
	Замедление времени . . . . .	185
	Сокращение длины . . . . .	186
	Одновременность и последовательность событий . . . . .	186
9.5	Пространство-время Минковского . . . . .	188
9.6	Сложение скоростей по Лоренцу . . . . .	191
9.7	Опыт Физо . . . . .	194
9.8	Явление аберрации . . . . .	195
9.9	Форма объектов, движущихся с релятивистскими скоростями .	197
9.10	Релятивистское выражение для импульса . . . . .	199

9.11	Релятивистское выражение для кинетической энергии . . . . .	202
9.12	Полная энергия тела . . . . .	203
9.13	Частицы с нулевой массой . . . . .	205
9.14	Релятивистская формула Циолковского . . . . .	206
9.15	Ускорители на встречных пучках . . . . .	209
	Контрольные вопросы . . . . .	212

## **Часть II Основы термодинамики и статистической физики 213**

### **Глава 10 Идеальный газ 215**

10.1	Состояние системы и эмпирическая температура . . . . .	215
	Общие положения молекулярно-кинетической теории . . . . .	215
	Состояние системы и нулевое начало термодинамики . . . . .	216
	Температура . . . . .	218
10.2	Уравнение Клапейрона—Менделеева . . . . .	220
10.3	Кинетическая теория идеальных газов . . . . .	224
10.4	Закон равнораспределения энергии . . . . .	227
10.5	Смеси газов . . . . .	229
	Контрольные вопросы . . . . .	231

### **Глава 11 Энергия и работа в термодинамике 233**

11.1	Первое начало термодинамики . . . . .	233
11.2	Работа идеального газа в различных процессах . . . . .	235
11.3	Теплоемкость системы . . . . .	237
11.4	Адиабатный процесс . . . . .	241
11.5	Уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов . . . . .	243
	Контрольные вопросы . . . . .	253

### **Глава 12 Второе начало термодинамики и энтропия 255**

12.1	Циклы и КПД тепловых машин . . . . .	255
12.2	Цикл Карно . . . . .	257
12.3	Двигатель внутреннего сгорания . . . . .	261
12.4	Внутреннеобратимая тепловая машина . . . . .	263
12.5	Второе начало термодинамики . . . . .	265
12.6	Абсолютная термодинамическая температура . . . . .	268
12.7	Энтропия . . . . .	270
	Изменение энтропии в процессах с идеальным газом . . . . .	271
	Энтропия и цикл Карно . . . . .	273
	Возрастание энтропии . . . . .	275
12.8	Статистический смысл энтропии . . . . .	278
	Вывод формулы Больцмана Планком . . . . .	281
12.9	Термодинамические потенциалы . . . . .	283
	Энтальпия . . . . .	284
	Свободная энергия . . . . .	285
	Свободная энергия Гиббса . . . . .	286
	Эффект Джоуля—Томсона . . . . .	287

Уравнение Клапейрона—Клаузиуса . . . . .	289
Контрольные вопросы . . . . .	290
<b>Глава 13 Распределение молекул по скоростям и координатам</b>	<b>291</b>
13.1 О закономерностях в мире хаоса . . . . .	291
Функция распределения . . . . .	292
Элементы теории вероятностей . . . . .	293
Распределение Пуассона . . . . .	296
13.2 Распределение молекул по скоростям . . . . .	300
Функция распределения молекул по скоростям . . . . .	301
Распределение Максвелла . . . . .	302
13.3 Характерные скорости молекул . . . . .	305
Наиболее вероятная скорость . . . . .	305
Распределение молекул по величинам безразмерной скорости . . . . .	306
Средняя арифметическая скорость . . . . .	307
Среднеквадратичная скорость . . . . .	308
Эксперимент по проверке распределения Максвелла . . . . .	309
13.4 Распределение молекул по координатам . . . . .	310
Барометрическая формула . . . . .	310
Политропная модель атмосферы . . . . .	313
Распределение Больцмана . . . . .	314
13.5 Распределение Максвелла—Больцмана . . . . .	316
Распределение по энергиям для многоатомных молекул . . . . .	316
Скорость химических реакций . . . . .	317
13.6 Адиабатный процесс в молекулярно-кинетической теории . . . . .	318
Контрольные вопросы . . . . .	320
<b>Глава 14 Явления переноса</b>	<b>321</b>
14.1 Столкновения молекул . . . . .	321
Свидание в лесу, ежик в тумане и атомная бомба . . . . .	326
14.2 Законы процессов переноса . . . . .	329
14.3 Кинетическая теория переноса . . . . .	334
Диффузия . . . . .	334
Теплопроводность . . . . .	336
Вязкость . . . . .	337
14.4 Броуновское движение . . . . .	338
Задача о блуждающем матросе . . . . .	338
Броуновское движение и диффузия . . . . .	340
Численные оценки для броуновского движения . . . . .	343
Контрольные вопросы . . . . .	344
<b>Часть III Основы классической теории электромагнетизма</b>	<b>345</b>
<b>Глава 15 Электрическое поле в вакууме</b>	<b>347</b>
15.1 Электрические свойства тел . . . . .	347
15.2 Закон Кулона . . . . .	349

15.3	Электрическое поле. Напряженность . . . . .	351
15.4	Принцип суперпозиции полей . . . . .	353
15.5	Силовые линии электрического поля . . . . .	354
15.6	Заряд в электрическом поле . . . . .	354
15.7	Поток вектора напряженности . . . . .	355
15.8	Теорема Остроградского—Гаусса . . . . .	357
15.9	Плотность заряда . . . . .	359
15.10	Применение теоремы Остроградского—Гаусса . . . . .	360
	Поле равномерно заряженной сферы . . . . .	360
	Поле бесконечно длинного заряженного цилиндра . . . . .	361
	Поле бесконечной заряженной плоскости . . . . .	362
	Поле плоского конденсатора . . . . .	362
15.11	Работа сил поля при перемещении заряда . . . . .	363
15.12	Потенциал электростатического поля . . . . .	364
15.13	Связь потенциала с напряженностью поля . . . . .	366
15.14	Примеры расчета потенциала . . . . .	367
	Потенциал равномерно заряженной сферы . . . . .	367
	Потенциал длинного заряженного цилиндра . . . . .	368
	Потенциалы заряженной плоскости и плоского конденсатора . . . . .	368
	Потенциал поля заряженного диска . . . . .	369
	Поле и потенциал шара, равномерно заряженного по объему . . . . .	370
15.15	Закон Кулона и размерность пространства . . . . .	372
	Контрольные вопросы . . . . .	373
<b>Глава 16</b>	<b>Проводники в электрическом поле</b>	<b>375</b>
16.1	Свободные заряды в проводниках . . . . .	375
16.2	Электрическое поле заряженного проводника . . . . .	376
16.3	Проводники во внешнем электрическом поле . . . . .	379
16.4	Емкость уединенной проводящей сферы . . . . .	382
16.5	Конденсаторы . . . . .	383
16.6	Соединения конденсаторов . . . . .	385
16.7	Энергия системы зарядов . . . . .	388
16.8	Энергия заряженного проводника . . . . .	391
16.9	Энергия заряженного конденсатора . . . . .	392
16.10	Энергия электрического поля . . . . .	393
	Контрольные вопросы . . . . .	395
<b>Глава 17</b>	<b>Электрическое поле в диэлектриках</b>	<b>397</b>
17.1	Диэлектрическая проницаемость . . . . .	397
17.2	Электрический диполь . . . . .	399
17.3	Поляризация диэлектриков . . . . .	403
	Электронная поляризация . . . . .	403
	Ориентационная (дипольная) поляризация . . . . .	405
	Поляризация жидких диэлектриков . . . . .	408
17.4	Вектор электрического смещения . . . . .	411
17.5	Электростатика однородных изотропных диэлектриков . . . . .	412



17.6	Условия на границе раздела двух диэлектриков . . . . .	415
	Контрольные вопросы . . . . .	417
<b>Глава 18</b>	<b>Постоянный электрический ток</b>	<b>419</b>
18.1	Сила тока и плотность тока в проводнике . . . . .	419
18.2	Закон сохранения заряда . . . . .	422
18.3	Сторонние силы . . . . .	423
18.4	Электродвижущая сила . . . . .	424
18.5	Закон Ома для однородного участка цепи . . . . .	424
18.6	Последовательное и параллельное соединение проводников . .	427
18.7	Закон Ома для замкнутой цепи . . . . .	428
18.8	Зарядка и разрядка конденсатора . . . . .	429
18.9	Правила Кирхгофа . . . . .	431
18.10	Закон Джоуля—Ленца . . . . .	435
18.11	Классическая теория металлов . . . . .	436
	Закон Ома . . . . .	437
	Закон Джоуля—Ленца . . . . .	438
	Закон Видемана—Франца . . . . .	439
	Контрольные вопросы . . . . .	440
<b>Глава 19</b>	<b>Частицы в магнитном поле</b>	<b>441</b>
19.1	Магнитная индукция . . . . .	441
19.2	Сила Лоренца . . . . .	444
19.3	Движение заряда в однородном магнитном поле . . . . .	445
19.4	Некоторые применения магнитного поля . . . . .	447
	Циклотрон . . . . .	447
	Определение заряда и массы электрона . . . . .	449
	Масс-спектрометры . . . . .	451
19.5	Эффект Холла . . . . .	452
19.6	Закон Ампера . . . . .	453
19.7	Контур с током в магнитном поле . . . . .	455
	Контрольные вопросы . . . . .	457
<b>Глава 20</b>	<b>Магнитное поле в вакууме</b>	<b>459</b>
20.1	Магнитное поле движущегося заряда . . . . .	459
20.2	Закон Био—Савара—Лапласа . . . . .	460
20.3	Магнитное поле прямолинейного проводника с током . . . . .	461
20.4	Магнитное поле на оси кругового тока . . . . .	463
20.5	Магнитное поле соленоида . . . . .	465
20.6	Взаимодействие двух проводников с током . . . . .	467
20.7	Поток вектора магнитной индукции . . . . .	469
20.8	Вихревой характер магнитного поля. Закон полного тока . . .	470
20.9	Преобразования Лоренца для электромагнитного поля . . . . .	472
	Контрольные вопросы . . . . .	474

<b>Глава 21</b>	<b>Магнитное поле в веществе</b>	<b>477</b>
21.1	Магнетики . . . . .	477
21.2	Вектор намагничивания . . . . .	478
21.3	Напряженность магнитного поля . . . . .	480
21.4	Циркуляция вектора напряженности магнитного поля в ве- ществе . . . . .	480
21.5	Неоднородные магнетики . . . . .	481
21.6	Происхождение молекулярных токов . . . . .	483
21.7	Диамагнетики . . . . .	484
21.8	Парамагнетики . . . . .	488
21.9	Ферромагнетизм . . . . .	490
	Модель Вейсса . . . . .	491
	Обменная энергия . . . . .	496
	Домены и гистерезис . . . . .	498
	Контрольные вопросы . . . . .	502
<b>Глава 22</b>	<b>Электромагнитная индукция</b>	<b>503</b>
22.1	Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле	503
22.2	Электродвижущая сила индукции . . . . .	506
	Закон Фарадея . . . . .	506
	Потокосцепление . . . . .	510
	Заряд, протекающий в контуре при изменении магнитного по- тока . . . . .	511
	Правило Ленца . . . . .	512
22.3	Явление самоиндукции . . . . .	514
	Индуктивность . . . . .	514
	Индуктивность соленоида . . . . .	515
	Токи замыкания и размыкания . . . . .	516
22.4	Энергия магнитного поля . . . . .	518
22.5	Электромагнитная пушка — рельсотрон . . . . .	519
	Контрольные вопросы . . . . .	522
<b>Глава 23</b>	<b>Уравнения Максвелла</b>	<b>525</b>
23.1	Вихревое электрическое поле . . . . .	525
23.2	Ток смещения . . . . .	527
23.3	Векторные поля . . . . .	529
23.4	Уравнения Максвелла в дифференциальной форме . . . . .	532
	Контрольные вопросы . . . . .	534