

УДК 577.3+[53:61](075.8)  
ББК 28.071я73-1+52.5я73-1  
Р38

*Рекомендовано Министерством общего и профессионального образования  
Российской Федерации в качестве учебника для студентов медицинских  
специальностей высших учебных заведений*

Ремизов, А. Н.

Р38 Медицинская и биологическая физика : учебник / А. Н. Ремизов. — 4-е изд., испр. и перераб. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. — 656 с. : ил.  
ISBN 978-5-9704-4623-2

Учебник написан в соответствии с программой и отражает мелико-биологическую направленность курса. Наряду с вопросами физики и биофизики в издании рассматриваются элементы теории вероятностей, математической статистики, вопросы медицинской метрологии, электроники и др.

Предназначен студентам и преподавателям медицинских, биологических и сельскохозяйственных специальностей.

Учебник дополнен учебным пособием (Ремизов А.Н., Максина А.Г. Медицинская и биологическая физика: сборник задач. — 2-е изд., перераб. и доп.), которое размещено в составе электронной библиотечной системы «Консультант студента. Электронная библиотека медицинского вуза»

УДК 577.3+[53:61](075.8)  
ББК 28.071я73-1+52.5я73-1

*Права на данное издание принадлежат ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа». Воспроизведение и распространение в каком бы то ни было виде части или целого издания не могут быть осуществлены без письменного разрешения ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа».*

© Ремизов А.Н., 2014  
© Ремизов В.А., правообладатель, 2014  
© ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2018  
©ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа»,  
оформление, 2018

ISBN 978-5-9704-4623-2

Предисловие.....	12
Введение.....	13

## РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ. ОСНОВЫ КИБЕРНЕТИКИ.....

Глава 1. Введение в метрологию.....	19
§ 1.1. Основные проблемы и понятия метрологии.....	19
§ 1.2. Метрологическое обеспечение.....	21
§ 1.3. Медицинская метрология. Специфика медико-биологических измерений.....	22
§ 1.4. Физические измерения в биологии и медицине.....	24
Глава 2. Элементы теории вероятностей.....	26
§ 2.1. Опыт с неоднозначными исходами. Случайное событие .....	26
§ 2.2. Действия над событиями. Противоположное событие. Несовместные события .....	27
§ 2.3. Классическое определение вероятности, аксиомы теории вероятностей.....	30
§ 2.4. Относительная частота события, закон больших чисел.....	32
§ 2.5. Независимые события. Сложение и умножение вероятностей независимых событий.....	34
§ 2.6. Дискретные и непрерывные случайные величины. Ряд распределения, функция распределения. Плотность вероятности.....	35
§ 2.7. Числовые характеристики случайных величин.....	38
§ 2.8. Некоторые законы распределения непрерывных случайных величин.....	40
Глава 3. Элементы математической статистики.....	45
§ 3.1. Основные понятия математической статистики.....	45
§ 3.2. Числовые характеристики статистического ряда .....	47
§ 3.3. Интервальная оценка.....	48
§ 3.4. Интервальная оценка генерального среднего для нормального закона распределения.....	50
§ 3.5. Методы проверки статистических гипотез.....	51
§ 3.6. Проверка гипотез о равенстве дисперсий, Е-критерий Фишера.....	54
§ 3.7. Проверка гипотез относительно равенства средних, f-критерий Стьюдента .....	55
§ 3.8. Непараметрическое сравнение двух выборок: критерий Манна—Уитни.....	57
Глава 4. Основы кибернетики.....	59
§ 4.1. Кибернетика и другие науки.....	59
§ 4.2. Кибернетические системы.....	60

§ 4.3. Элементы теории информации.....	63
§ 4.4. Управление и регулирование.....	69
§ 4.5. Моделирование.....	73
§ 4.6. Понятие о биологической и медицинской кибернетике.....	77
<b>РАЗДЕЛ 2. МЕХАНИКА. АКУСТИКА.....</b>	<b>83</b>
Глава 5. Механика вращательного движения.....	85
§ 5.1. Кинематика вращательного движения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси.....	85
§ 5.2. Основные понятия. Уравнение динамики вращательного движения .....	88
§ 5.3. Закон сохранения момента импульса.....	94
§ 5.4. Понятие о свободных осях вращения.....	97
§ 5.5. Понятие о степенях свободы.....	98
§ 5.6. Центрифугирование.....	101
Глава 6. Некоторые вопросы биомеханики.....	104
§ 6.1. Сочленения и рычаги в опорно-двигательном аппарате человека.....	104
§ 6.2. Механическая работа человека. Эргометрия.....	106
§ 6.3. Перегрузка и невесомость.....	108
§ 6.4. Вестибулярный аппарат как инерциальная система ориентации.....	112
Глава 7. Механические колебания и волны.....	114
§ 7.1. Гармонические колебания.....	114
§ 7.2. Кинетическая и потенциальная энергии колебательного движения.....	117
§ 7.3. Сложение гармонических колебаний.....	118
§ 7.4. Сложное колебание. Гармонический спектр сложного колебания.....	123
§ 7.5. Затухающие колебания.....	124
§ 7.6. Вынужденные колебания. Резонанс.....	126
§ 7.7. Автоколебания.....	129
§ 7.8. Уравнение механических волн.....	130
§ 7.9. Поток энергии волн. Вектор Умова.....	132
§ 7.10. Ударные волны.....	133
§ 7.11. Эффект Доплера.....	134
Глава 8. Акустика.....	137
§ 8.1. Природа звука. Физические характеристики.....	137
§ 8.2. Характеристики слухового ощущения. Звуковые измерения . . . . 1	
§ 8.3. Физические основы звуковых методов исследования в клинике.....	143

§ 8.4. Волновое сопротивление. Отражение звуковых волн. Реверберация.....	145
§ 8.5. Физика слуха.....	147
§ 8.6. Ультразвук и его применения в медицине.....	152
§8.7. Инфразвук.....	156
§ 8.8. Вибрации.....	157
Глава 9. Течение и свойства жидкостей.....	158
§ 9.1. Вязкость жидкости. Уравнение Ньютона. Ньютоновские и неньютоновские жидкости.....	158
§ 9.2. Течение вязкой жидкости по трубам. Формула Пуазейля.....	159
§ 9.3. Движение тел в вязкой жидкости. Закон Стокса.....	163
§ 9.4. Методы определения вязкости жидкости. Клинический метод определения вязкости крови.....	164
§ 9.5. Ламинарное и турбулентное течения. Число Рейнольдса.....	167
§ 9.6. Особенности молекулярного строения жидкостей.....	169
§ 9.7. Поверхностное натяжение.....	170
§ 9.8. Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления.....	171
Глава 10. Механические свойства твердых тел и биологических тканей . . .	175
§ 10.1. Кристаллические и аморфные тела. Полимеры.....	175
§ 10.2. Жидкие кристаллы.....	181
§ 10.3. Механические свойства твердых тел.....	183
§10.4. Механические свойства биологических тканей .....	190
Глава 11. Физические вопросы гемодинамики .....	197
§11.1. Модели кровообращения .....	197
§ 11.2. Пульсовая волна.....	201
§ 11.3. Работа и мощность сердца. Аппарат искусственного кровообращения.....	204
§ 11.4. Физические основы клинического метода измерения давления крови.....	205
§ 11.5. Определение скорости кровотока.....	207

### РАЗДЕЛ 3. РАВНОВЕСНАЯ И НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА. ДИФFUЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАНАХ..... 209

Глава 12. Термодинамика.....	211
§ 12.1. Основные понятия термодинамики. Первое начало термодинамики.....	211
§ 12.2. Второе начало термодинамики. Энтропия.....	215
§ 12.3. Критика теории «тепловой смерти» мира.....	225
§ 12.4. Термодинамические потенциалы.....	226
§ 12.5. Системы с переменным числом частиц. Химический и электрохимический потенциалы.....	228

§ 12.6. Стационарное состояние. Принцип минимума производства энтропии.....	231
§ 12.7. Организм как открытая система.....	233
§ 12.8. Термометрия и калориметрия.....	236
§ 12.9. Физические свойства нагретых и холодных сред, используемых для лечения. Применение низких температур в медицине.....	240
Глава 13. Физические процессы в биологических мембранах.....	242
§ 13.1. Строение и модели мембран.....	242
§ 13.2. Некоторые физические свойства и параметры мембран.....	246
§ 13.3. Перенос молекул (атомов) через мембраны.....	247
§ 13.4. Уравнение Нернста-Планка. Перенос ионов через мембраны....	253
§ 13.5. Активный транспорт.....	257
§ 13.6. Разновидности пассивного переноса молекул и ионов через биологические мембраны.....	258
§ 13.7. Потенциал покоя.....	259
§ 13.8. Потенциал действия и его распространение.....	262
РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.....	267
Глава 14. Электрическое поле.....	269
§ 14.1. Напряженность и потенциал — характеристики электрического поля.....	269
§ 14.2. Электрический диполь.....	274
§ 14.3. Понятие о мультиполе.....	278
§ 14.4. Дипольный электрический генератор (токовый диполь)....	279
§ 14.5. Физические основы электрокардиографии.....	281
§ 14.6. Диэлектрики в электрическом поле.....	285
§ 14.7. Пьезоэлектрический эффект.....	290
§ 14.8. Энергия электрического поля.....	291
Глава 15. Электрический ток.....	294
§ 15.1. Плотность и сила тока.....	294
§ 15.2. Электродвижущая сила источников тока.....	295
§ 15.3. Электропроводимость электролитов.....	296
§ 15.4. Электропроводимость биологических тканей и жидкостей при постоянном токе.....	298
§ 15.5. Электрический разряд в газах. Аэроионы и их лечебно-профилактическое действие.....	299
§ 15.6. Внутренняя контактная разность потенциалов. Термоэлектродвижущая сила.....	301
Глава 16. Магнитное поле.....	305
§ 16.1. Индукция магнитного поля.....	305
§ 16.2. Закон Ампера. Энергия контура с током в магнитном поле.....	308

§ 16.3. Действие магнитного поля на движущийся электрический заряд. Сила Лоренца.....	311
§ 16.4. Экспериментальное определение удельного заряда частиц.....	314
§ 16.5. Напряженность магнитного поля. Закон Био—Савара—Лапласа и его применение.....	315
§ 16.6. Закон полного тока. Напряженность магнитного поля соленоида.....	319
§ 16.7. Магнитные свойства вещества.....	321
§ 16.8. Магнитные свойства тканей организма. Физические основы магнитобиологии.....	326
Глава 17. Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля.....	328
§ 17.1. Основной закон электромагнитной индукции.....	328
§ 17.2. Взаимная индукция.....	331
§ 17.3. Самоиндукция.....	332
§ 17.4. Вихревые токи.....	335
§ 17.5. Энергия магнитного поля.....	336
Глава 18. Электромагнитные колебания и волны.....	339
§ 18.1. Свободные электромагнитные колебания.....	339
§ 18.2. Переменный ток.....	343
§ 18.3. Полное сопротивление в цепи переменного тока. Резонанс напряжений.....	344
§ 18.4. Полное сопротивление (импеданс) тканей организма. Физические основы реографии.....	347
§ 18.5. Электрический импульс и импульсный ток.....	349
§ 18.6. Прохождение прямоугольных импульсов через линейную цепь. Дифференцирующие и интегрирующие цепи.....	351
§ 18.7. Понятие о теории Максвелла. Ток смещения.....	354
§ 18.8. Электромагнитные волны.....	357
§ 18.9. Шкала электромагнитных волн. Классификация частотных интервалов, принятая в медицине.....	360
Глава 19. Физические процессы в тканях при воздействии током и электромагнитными полями.....	363
§ 19.1. Первичное действие постоянного тока на ткани организма. Гальванизация. Электрофорез лекарственных веществ.....	363
§ 19.2. Воздействие переменными (импульсными) токами.....	365
§ 19.3. Воздействие переменным магнитным полем.....	369
§ 19.4. Воздействие переменным электрическим полем.....	370
§ 19.5. Воздействие электромагнитными волнами.....	373
РАЗДЕЛ 5. ОБЩАЯ И МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.....	375
Глава 20. Содержание общей и медицинской электроники.....	377
§ 20.1. Электроника и некоторые направления ее развития.....	377

§ 20.2. Медицинская электроника. Основные группы медицинских электронных приборов и аппаратов.....	380
§ 20.3. Электробезопасность медицинской аппаратуры.....	382
§ 20.4. Надежность медицинской аппаратуры.....	388
Глава 21. Система получения медико-биологической информации..	392
§ 21.1. Структурная схема съема, передачи и регистрации медико-биологической информации.....	392
§ 21.2. Электроды для съема биоэлектрического сигнала.....	393
§ 21.3. Датчики медико-биологической информации.....	395
§ 21.4. Передача сигнала. Радиотелеметрия.....	398
§ 21.5. Аналоговые регистрирующие устройства.....	400
§ 21.6. Принцип работы медицинских приборов, регистрирующих биопотенциалы.....	404
Глава 22. Усилители.....	407
§ 22.1. Коэффициент усиления усилителя.....	407
§ 22.2. Амплитудная характеристика усилителя. Нелинейные искажения.....	408
§ 22.3. Частотная характеристика усилителя. Линейные искажения.....	410
§ 22.4. Усилитель на транзисторе.....	412
§ 22.5. Усиление биоэлектрических сигналов.....	421
Глава 23. Генераторы.....	432
§ 23.1. Разновидности генераторов электрических колебаний.....	432
§ 23.2. Генератор гармонических колебаний на транзисторе.....	433
§ 23.3. Генераторы импульсных (релаксационных) колебаний.....	434
§ 23.4. Электронный осциллограф.....	436
§ 23.5. Электронные стимуляторы. Низкочастотная физиотерапевтическая электронная аппаратура.....	439
§ 23.6. Высокочастотная физиотерапевтическая электронная аппаратура. Аппараты электрохирургии.....	442
РАЗДЕЛ 6. ОПТИКА.....	445
Глава 24. Интерференция и дифракция света. Голография.....	447
§ 24.1. Когерентные источники света. Условия для наибольшего усиления и ослабления волн.....	447
§ 24.2. Интерференция света в тонких пластинках (пленках). Просветление оптики.....	451
§ 24.3. Интерферометры и их применение. Понятие об интерференционном микроскопе.....	455
§ 24.4. Принцип Гюйгенса-Френеля.....	457
§ 24.5. Дифракция на щели в параллельных лучах.....	458
§ 24.6. Дифракционная решетка. Дифракционный спектр.....	461
§ 24.7. Основы рентгеноструктурного анализа.....	468

§ 24.8. Понятие о голографии и ее возможном применении в медицине.....	470
Глава 25. Поляризация света.....	476
§25.1. Свет естественный и поляризованный. Закон Малюса.....	476
§ 25.2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков.....	478
§ 25.3. Поляризация света при двойном лучепреломлении.....	479
§ 25.4. Вращение плоскости поляризации. Поляриметрия.....	481
§ 25.5. Исследование биологических тканей в поляризованном свете.....	484
Глава 26. Геометрическая оптика.....	486
§ 26.1. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики.....	486
§ 26.2. Аберрации линз.....	487
§ 26.3. Понятие об идеальной центрированной оптической системе.....	491
§ 26.4. Оптическая система глаза и некоторые ее особенности.....	494
§ 26.5. Недостатки оптической системы глаза и их устранение.....	499
§ 26.6. Лупа.....	500
§ 26.7. Оптическая система и устройство биологического микроскопа.....	502
§ 26.8. Разрешающая способность и полезное увеличение микроскопа. Понятие о теории Аббе.....	506
§ 26.9. Некоторые специальные приемы оптической микроскопии. . .	511
§ 26.10. Волоконная оптика и ее использование в медицинских приборах.....	515
Глава 27. Тепловое излучение тел.....	517
§ 27.1. Характеристики теплового излучения. Черное тело.....	517
§ 27.2. Закон Кирхгофа.....	519
§ 27.3. Законы излучения черного тела.....	520
§ 27.4. Излучение солнца. Источники теплового излучения, применяемые для лечебных целей.....	522
§ 27.5. Теплоотдача организма. Понятие о термографии.....	524
§ 27.6. Инфракрасное излучение и его применение в медицине . . .	527
§ 27.7. Ультрафиолетовое излучение и его применение в медицине . . .	528
§ 27.8. Фотоэлектрический эффект и его некоторые применения...	529
§ 27.9. Световой эталон. Некоторые световые величины.....	534

## РАЗДЕЛ 7. ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ БИОФИЗИКИ.....

Глава 28. Волновые свойства частиц. Элементы квантовой механики.....	539
§ 28.1. Гипотеза де Бройля. Опыты по дифракции электронов и других частиц.....	539



§ 28.2. Электронный микроскоп. Понятие об электронной оптике ...	542
§ 28.3. Волновая функция и ее физический смысл.....	546
§ 28.4. Соотношения неопределенностей.....	547
§ 28.5. Уравнение Шредингера. Электрон в потенциальной яме . . .	548
§ 28.6. Применение уравнения Шредингера к атому водорода. Квантовые числа.....	552
§ 28.7. Понятие о теории Бора.....	556
§ 28.8. Электронные оболочки сложных атомов.....	558
§ 28.9. Энергетические уровни молекул.....	560
Глава 29. Излучение и поглощение энергии атомами и молекулами.....	561
§ 29.1. Особенности излучения и поглощения энергии атомами и молекулами.....	561
§ 29.2. Поглощение света.....	564
§ 29.3. Рассеяние света.....	567
§ 29.4. Оптические атомные спектры.....	569
§ 29.5. Молекулярные спектры.....	571
§ 29.6. Различные виды люминесценции.....	574
§ 29.7. Фотолюминесценция.....	574
§ 29.8. Хемилюминесценция.....	577
§ 29.9. Фотобиологические процессы.....	578
§ 29.10. Биофизические основы зрительной рецепции.....	580
Глава 30. Лазеры. Радиоспектроскопия.....	585
§ 30.1. Лазеры и их применение в медицине .....	585
§ 30.2. Расщепление энергетических уровней атомов в магнитном поле.....	589
§ 30.3. Электронный парамагнитный резонанс и его медико-биологическое применение .....	591
§ 30.4. Ядерный магнитный резонанс. ЯМР-интроскопия.....	596
 РАЗДЕЛ 8. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ. ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ.....	599
Глава 31. Рентгеновское излучение .....	601
§ 31.1. Устройство рентгеновской трубки. Тормозное рентгеновское излучение.....	601
§ 31.2. Характеристическое рентгеновское излучение. Атомные рентгеновские спектры.....	604
§ 31.3. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом . . .	606
§ 31.4. Физические основы применения рентгеновского излучения в медицине.....	609
Глава 32. Радиоактивность. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.....	612
§ 32.1. Радиоактивность.....	612
§ 32.2. Основной закон радиоактивного распада. Активность.....	614

§ 32.3. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом . . . .	616
§ 32.4. Биофизические основы действия ионизирующих излучений на организм.....	620
§ 32.5. Детекторы ионизирующих излучений.....	621
§ 32.6. Использование радионуклидов и нейтронов в медицине . . . .	626
§ 32.7. Ускорители заряженных частиц и их использование в медицине.....	629
<b>Глава 33. Элементы дозиметрии. Элементарные частицы.....</b>	<b>633</b>
§33.1. Доза излучения и экспозиционная доза. Мощность дозы . . . .	633
§ 33.2. Количественная оценка биологического действия ионизирующего излучения. Эквивалентная доза.....	635
§ 33.3. Дозиметрические приборы.....	637
§ 33.4. Защита от ионизирующего излучения.....	63В
Заключение.....	640
Предметный указатель.....	642

## ПРЕДИСЛОВИЕ

По мнению автора, курс физики в медицинском вузе наряду с фундаментальностью должен иметь четкий «медицинский адрес», т.е. быть профилизованным. Профилизация заключается в отборе материала и иллюстрации возможных применений физики в медицине. Профилизация не только мотивирует студентов на изучение физики, она необходима в связи с достаточно ограниченным объемом курса физики в медвузах.

Одна из методических сложностей данного курса — сочетание фундаментализации с профилизацией. В этом одна из особенностей учебника. Другая особенность связана с тем, что биофизика не выделена в виде отдельной части, а излагается в соответствующих разделах как физика живого.

В качестве вводного раздела к основному материалу рассматриваются математическая обработка результатов изменений и основы кибернетики.

Описание аппаратуры в учебнике изложено схематично, так как более подробно оно дано в «Руководстве к лабораторным работам по медицинской и биологической физике» И.А. Эссауловой, М.Е. Блохиной, Л.Д. Гонцова (М., 1987) [1]. Примеры и задачи можно найти в учебном пособии «Медицинская и биологическая физика: сборник задач. — 2-е изд., перераб. и доп.» Ремизова А.Н., Максиной А.Г. [2], которое размещено в составе электронной библиотечной системы «Консультант студента. Электронная библиотека медицинского вуза» ([www.studmedlib.ru/extra](http://www.studmedlib.ru/extra)). Учебник и перечисленные пособия составляют единый методический комплекс.

Главы 2 и 3 написаны Е.В. Фаустовым, кандидатом технических наук, доцентом кафедры медицинской и биологической физики Российского национального исследовательского медицинского университета имени Н.И. Пирогова. Глава 8 написана в соавторстве с М.Р. Богомильским.

Автор благодарен профессору Е.В. Кортукову за квалифицированное рецензирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее широким понятием, включающим все, окружающее нас и нас самих, является материя. Дать обычное логическое определение материи, при котором указывается более широкое понятие, а затем отмечается признак предмета определения, невозможно, так как более широкого понятия, чем материя, нет. Поэтому вместо определения часто просто говорят, что материя есть объективная реальность, данная нам в ощущениях.

Материя не существует без движения. Под движением понимаются все происходящие во Вселенной изменения и процессы. Условно различные и многообразные формы движения можно представить четырьмя видами: физическая, химическая, биологическая и социальная. Это позволяет классифицировать разные науки в зависимости от того, какой вид движения они изучают. Физика изучает физическую форму движения материи.

Более детально физическую форму движения материи можно подразделить на механическую, молекулярно-тепловую, электромагнитную, атомную, внутриядерную. Естественно, такое деление условно. Тем не менее физику как учебную дисциплину обычно представляют именно такими разделами,

Физика, как и другие науки, использует различные методы исследования, но все они в конечном счете соответствуют единству теории и практики и отражают общий научный подход к познанию окружающей действительности: наблюдение, размышление, опыт. На основе наблюдений создаются теории, формулируются законы и гипотезы, они проверяются и используются на практике. Практика — критерий теорий, она позволяет их уточнять. Формулируются новые теории и законы, они вновь проверяются практикой. Таким образом человек продвигается ко все более полному пониманию окружающего мира.

Различные формы движения материи взаимосвязаны и взаимозависимы, что обуславливает появление новых наук, лежащих на стыке прежних — биофизика, астрофизика, химическая физика и др., а также использование достижений одной науки для развития другой.

Читателя, естественно, интересует связь физики и медицины. Проникновение физических знаний, методов и аппаратуры в медицину достаточно многогранно, ниже предлагаются лишь некоторые основные аспекты этой связи.