

А.Н. Ремизов

МЕДИЦИНСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УЧЕБНИК

4-е издание,
исправленное и переработанное



Москва
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА
«ГЭОТАР-Медиа»
2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

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, F-критерий Фишера	54
§ 3.7. Проверка гипотез относительно равенства средних, t-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
РАЗДЕЛ 2. МЕХАНИКА. АКУСТИКА	83
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 Допплера	134
Глава 8. Акустика	137
§ 8.1. Природа звука. Физические характеристики	137
§ 8.2. Характеристики слухового ощущения. Звуковые измерения	140
§ 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	
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 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 централизованной 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	537
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
Глава 33. Элементы дозиметрии. Элементарные частицы	633
§ 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.	638
Заключение	640
Предметный указатель.	642

Глава 1

Введение в метрологию

Метрологией называют науку об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В главе наряду с общими вопросами метрологии рассматриваются особенности измерений в биологии и медицине.

§ 1.1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

Измерением называют нахождение значения физической величины опытным путем с помощью технических средств. Измерения позволяют установить закономерности природы и являются элементом познания окружающего нас мира.

Различают измерения прямые, при которых результат получается непосредственно из измерения самой величины (например, измерение температуры тела медицинским термометром, измерение длины предмета линейкой), и косвенные, при которых искомое значение величины находят по известной зависимости между ней и непосредственно измеряемыми величинами (например, определение массы тела при взвешивании с учетом выталкивающей силы, определение вязкости жидкости по скорости падения в ней шарика). Технические средства для производства измерений (средства измерений) могут быть разных типов. Наиболее известным читателю средством измерений является измерительный прибор, в котором измерительная информация представляется в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (например, температура представлена в термометре длиной столбика ртути, сила тока — показанием стрелки амперметра или цифровым значением).

К средствам измерений относят также меру, которая предназначена для воспроизведения физической величины заданного размера (например, гири определенной массы).

Одно из распространенных средств измерений — измерительный преобразователь (датчик).

Он предназначен для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, об-

работки и (или) хранения (например, температура может быть представлена электрическим сигналом, см. § 15.6).

Значение физической величины, полученное при измерении, отличается от истинного. Степень приближения результатов измерения к истинному значению измеряемой величины характеризуется *точностью измерений*. Точность измерений является качественным показателем измерений.

Количественная оценка результата измерений дается не его точностью, а *погрешностью* — отклонением результатов измерений от истинного значения измеряемой величины. Чем меньше погрешность, тем выше точность измерений.

Погрешности объясняются несовершенством средства измерений, неопытностью персонала, влиянием посторонних факторов и др. Из этих причин можно выделить те, которые проявляются нерегулярно и при повторных измерениях оказывают иное количественное воздействие на результат. Такие факторы приводят к случайным погрешностям. Это случайные величины, поэтому их можно обработать, проанализировать и таким образом учесть, используя соответствующий математический аппарат: теорию вероятностей и математическую статистику (см. гл. 2 и 3).

Сведения по теории погрешностей, необходимые студентам-медикам, приведены в [1].

Одним из основных метрологических понятий являются единицы физических величин. *Единицей физической величины называют физическую величину, принятую по соглашению в качестве основы для количественной оценки соответствующей физической величины.*

Единицы физических величин в основном группируются в системы единиц. Основной является Международная система единиц (СИ). Справочный материал по единицам физических величин приведен в [2]. Не останавливаясь на этих вопросах, рассмотрим лишь относительные и логарифмические величины.

В измерительной практике достаточно широкое распространение получили относительные величины, которые являются отношением физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную. В качестве примера можно указать концентрацию раствора, относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости, коэффициент полезного действия, относительную деформацию, коэффициент трения, вязкость крови относительно вязкости воды и т.д.

Относительная величина не имеет размерности и названия. Однако в ряде случаев относительную величину традиционно выражают со сто-

кратным или тысячекратным увеличением. При этом она уже будет иметь единицу, соответственно процент (%) или промилле (‰).

Для выражения уровня звукового давления, уровня интенсивности звука, уровня усиления электрического сигнала, выражения частотного интервала и т.п. удобнее использовать логарифм относительной величины (наиболее распространен десятичный логарифм):

$$L = \lg \frac{a_2}{a_1},$$

где a_1 и a_2 — одноименные физические величины.

Единицей логарифмической величины является бел (Б):

$$1 \text{ Б} = \lg \frac{a_2}{a_1} \text{ при } a_2 = 10 a_1,$$

если a — энергетическая величина (мощность, интенсивность, энергия и т.п.), или

$$1 \text{ Б} = 2 \lg \frac{a_2}{a_1} \text{ при } a_2 = \sqrt{10} a_1,$$

если a — силовая величина (сила, механическое напряжение, давление, напряженность электрического поля и т.п.).

Достаточно распространена доляная единица — децибел (дБ):

$$1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}.$$

§ 1.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Измерения проводятся с использованием технических средств. Результаты измерений должны соответствовать определенной точности и быть одинаковыми, если измеряются идентичные величины независимо от того, производятся ли измерения одномоментно или в разное время, в одной лаборатории или в разных.

Для выполнения этих условий должно осуществляться соответствующее *метрологическое обеспечение* — установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Организационной основой метрологического обеспечения в нашей стране является метрологическая служба России, состоящая из государственных и ведомственных метрологических служб.

Под *единством измерений* понимают одинаковость результатов тождественных измерений независимо от места и времени их проведения, а также достоверность измерений. Единство измерений позволяет сопо-