

В.Ф. Антонов, Е.К. Козлова, А.М. Черныш

ФИЗИКА И БИОФИЗИКА

ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ ВУЗОВ

УЧЕБНИК

Рекомендовано ГОУ ВПО «Московская медицинская академия имени И.М. Сеченова» в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 060101 «Лечебное дело», 060103 «Педиатрия», 060104 «Медико-профилактическое дело», 060108 «Фармация»



Москва
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА
«ГЭОТАР-Медиа»
2010

УДК [53+577] (075.8)
ББК 22.3я73-1+28.07я73-1
А72

Авторский коллектив:

Антонов Валерий Федорович, д-р биол. наук, проф., зав. кафедрой медицинской и биологической физики ММА им. И.М. Сеченова;

Козлова Елена Карловна, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры медицинской и биологической физики ММА им. И.М. Сеченова;

Черныш Александр Михайлович, д-р биол. наук, проф. кафедры медицинской и биологической физики ММА им. И.М. Сеченова.

Антонов, Валерий Федорович

А72 Физика и биофизика: учеб. / В. Ф. Антонов, Е. К. Козлова, А. М. Черныш. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. — 480 с. : ил.

ISBN 978-5-9704-1644-0

В учебнике изложены разделы физики, необходимые для понимания общего курса. Рассмотрены различные виды колебаний, механические и электромагнитные волны, законы акустики. Представлены механизмы возникновения рентгеновского излучения и его взаимодействие с веществом. Освещены основные представления квантовой механики и радиоактивного излучения. Изложено применение этих физических явлений в медицинской практике.

Во второй части учебника излагается биофизическая сущность организации функционирования биологических объектов на клеточном, тканевом уровнях, на уровне органов и организма в целом. Раскрывается природа ионного обмена, биоэлектрогенеза, биомеханики мышечного сокращения и системы кровообращения. Большое внимание уделено методам моделирования биологических процессов. Рассмотрены проблемы взаимодействия биосферы и физических полей окружающего мира. Обсуждаются проблемы собственных излучений организма человека. Прилагаются типовые тесты по каждой главе учебника.

Учебник предназначен студентам медицинских и фармацевтических вузов, а также студентам, изучающим биофизику.

УДК [53+577] (075.8)
ББК 22.3я73-1+28.07я73-1

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».

ISBN 978-5-9704-1644-0

© Коллектив авторов, 2009

© ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2010

© ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа»,
оформление, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

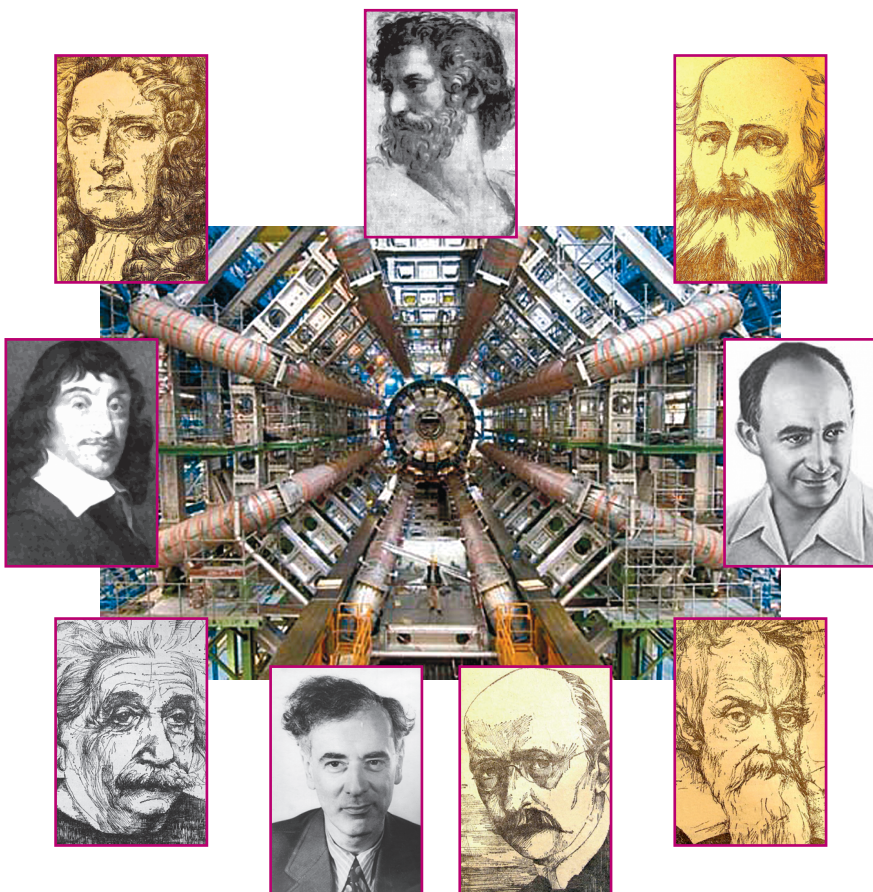
Предисловие	7
Введение	8
ФИЗИКА.	11
РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	13
Глава 1. Механические колебания	14
1.1. Гармонические колебания	15
1.2. Затухающие колебания	19
1.3. Вынужденные колебания.	21
1.4. Автоколебания	24
1.5. Гармонический анализ сложных колебаний.	25
Глава 2. Механические волны	31
2.1. Волны в упругих средах	31
2.2. Энергия механической волны	35
2.3. Ударные волны	37
Глава 3. Звуковые волны	40
3.1. Физические характеристики звука	40
3.2. Характеристики восприятия звука	44
Глава 4. Ультразвук и его применение в медицине	50
4.1. Ультразвук, его свойства.	50
4.2. Методы ультразвуковой диагностики.	53
4.3. Эффект Доплера и его применение в медицине	58
4.4. Применение ультразвука в терапии.	60
РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	63
Глава 5. Электромагнитные волны	64
5.1. Электростатическое поле. Постоянное магнитное поле.	64
5.2. Основные положения теории Максвелла	68
5.3. Электромагнитное поле. Электромагнитные волны	70
5.4. Шкала электромагнитных волн.	76
Глава 6. Тепловое излучение	78
6.1. Физические характеристики теплового излучения	78
6.2. Законы теплового излучения	81
Глава 7. Элементы квантовой механики	87
7.1. Предпосылки возникновения квантовой механики	87
7.2. Квант энергии. Теория Бора. Длина волны де Бройля	88
7.3. Корпускулярно-волновой дуализм. Соотношения неопределенностей. Уравнение Шредингера.	92

Глава 8. Спектры излучения атомов и молекул	100
8.1. Уровни энергии атомов. Атомные спектры	100
8.2. Уровни энергии молекул. Молекулярные спектры	103
Глава 9. Люминесценция. Лазер	109
9.1. Люминесценция, ее характеристики	109
9.2. Лазерное излучение, его свойства	115
Глава 10. Рентгеновское излучение	126
10.1. Рентгеновское излучение, механизмы его возбуждения. . .	126
10.2. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом	130
10.3. Физические основы использования рентгеновского излучения в медицине	133
Глава 11. Рентгеновские компьютерные томографы	136
11.1. Физические проблемы получения рентгеновских снимков . . .	136
11.2. Метод рентгеновской компьютерной томографии.	139
11.3. Современные рентгеновские компьютерные томографы . . .	142
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА	147
Глава 12. Радиоактивность	148
12.1. Состав атомных ядер	148
12.2. Закон радиоактивного распада	151
Глава 13. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом . . .	161
13.1. Пучки протонов, электронов, нейтронов	161
13.2. Взаимодействие гамма-квантов с веществом	166
13.3. Взаимодействие античастиц	167
Глава 14. Методы ядерной физики в медицине	169
14.1. Радионуклидная диагностика	170
14.2. Позитронно-эмиссионная и магнитно-резонансная томография	172
14.3. Радиоизотопная терапия	180
БИОФИЗИКА	183
РАЗДЕЛ 4. БИОФИЗИКА КЛЕТКИ	185
Глава 15. Клеточные мембраны	186
15.1. Структура и функции биологических мембран	186
15.2. Физические методы изучения структуры мембраны.	189
15.3. Жидко-мозаичная модель мембраны	198
15.4. Подвижность фосфолипидных молекул в мембранах.	200
15.5. Физическое состояние и фазовые переходы липидов в мембранах	205

15.6. Модельные липидные мембраны	209
Глава 16. Транспорт веществ через биологические мембраны	212
16.1. Электрохимический потенциал	212
16.2. Пассивный перенос веществ через мембрану	213
16.3. Активный транспорт веществ. Опыт Уссинга	222
16.4. Липидные поры в мембранах	225
Глава 17. Биоэлектrogenез в клетках	236
17.1. Измерение биопотенциалов	236
17.2. Потенциал покоя	239
17.3. Потенциал действия	245
17.4. Метод фиксации потенциала. Ионные токи в аксоне	251
17.5. Модель Ходжкина—Хаксли	257
17.6. Ионные каналы клеточных мембран	261
17.7. Ионные насосы в мембранах	270
17.8. Распространение нервного импульса вдоль аксона	272
17.9. Потенциал действия кардиомиоцита	275
РАЗДЕЛ 5. БИОФИЗИКА ТКАНЕЙ И ОРГАНОВ	283
Глава 18. Электрическая активность органов	284
18.1. Метод электрографии	284
18.2. Физические принципы электрокардиографии	286
18.3. Исследования электрической активности головного мозга	294
Глава 19. Автоволны в активных средах	299
19.1. Автоколебания в органах и тканях	299
19.2. Активная среда. Автоволны	301
19.3. Тау-модель распространения автоволн	303
19.4. Трансформация ритма в неоднородной по рефрактерности активной среде	308
19.5. Ревербераторы в неоднородных средах	309
19.6. Механизм возникновения экстравозбуджений	313
Глава 20. Биофизика мышечного сокращения	316
20.1. Структура мышцы	316
20.2. Биомеханика мышцы	320
20.3. Уравнение хилла. Мощность одиночного сокращения	326
20.4. Электромеханическое сопряжение в мышцах	329
Глава 21. Биофизические основы кровообращения	333
21.1. Реология крови	333
21.2. Гемодинамика. Режимы течения	338
21.3. Пульсовая волна. Модель Франка	345

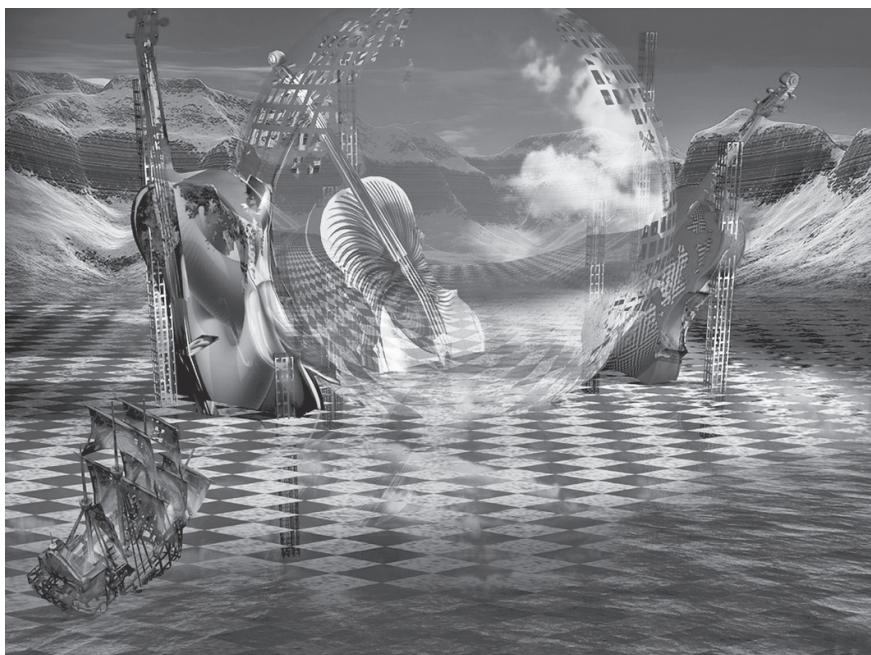
21.4. Кровоток при локальном сужении сосудов. Резистивная модель	354
21.5. Фильтрационно-реабсорбционные процессы в капиллярах	361
РАЗДЕЛ 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ В БИОФИЗИКЕ	371
Глава 22. Моделирование биофизических процессов	372
22.1. Метод моделирования. Основные этапы моделирования. . .	372
22.2. Математические модели изменения численности популяции	375
22.3. Фармакокинетическая модель	384
Глава 23. Термодинамика биологических систем.	390
23.1. Общие положения	390
23.2. Первый закон термодинамики в биологии	392
23.3. Второй закон термодинамики в биологии	394
23.4. Термодинамические потенциалы	397
23.5. Стационарное состояние	400
23.6. Биофизика необратимых процессов	402
РАЗДЕЛ 7. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ЧЕЛОВЕК	409
Физические поля и биосфера земли	410
Глава 24. Внешние физические поля и человек	412
24.1. Естественные источники электромагнитных излучений. . .	412
24.2. Взаимодействие неионизирующих электромагнитных излучений с веществом	415
24.3. Прохождение ионизирующих излучений через биологические объекты	419
24.4. Дозиметрия ионизирующих излучений	422
24.5. Естественный радиоактивный фон земли.	427
24.6. Нарушения естественного радиоактивного фона	431
Глава 25. Собственные физические поля человека	436
25.1. Виды физических полей человека. Их источники	437
25.2. Низкочастотные электрические и магнитные поля	439
25.3. Инфракрасное излучение	444
25.4. Электромагнитные волны СВЧ-диапазона	449
25.5. Оптическое излучение тела человека	452
25.6. Акустические волны тела человека	453
Типовые тестовые задания	457
Литература	477

ФИЗИКА



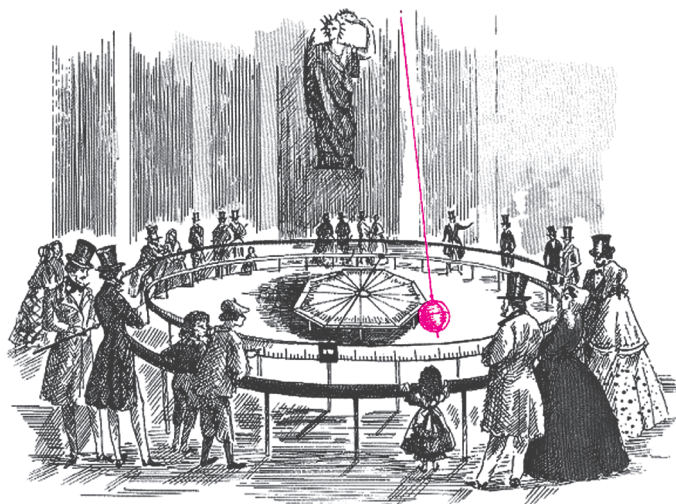
Раздел 1

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



Глава 1

Механические колебания



***Колебаниями** называют движения или процессы, характеризующиеся той или иной степенью повторяемости во времени.*

Таким свойством могут обладать явления и процессы различной природы: механической, электрической, тепловой, биологической. Например, меняют положение в пространстве маятник часов, струны музыкальных инструментов, изменяются величины напряжения в электрическом контуре и суточная температура воздуха, сокращается сердечная мышца, возникают нервные импульсы.

Всем колебаниям независимо от их природы присущи некоторые общие закономерности.

Одним из видов колебаний являются механические колебания. В зависимости от характера воздействия на колебательную систему различают свободные, вынужденные и автоколебания.

Свободные — колебания, которые возникают в системе под действием внутренних сил и происходят после того, как система тем или иным способом была выведена из состояния равновесия. Если на

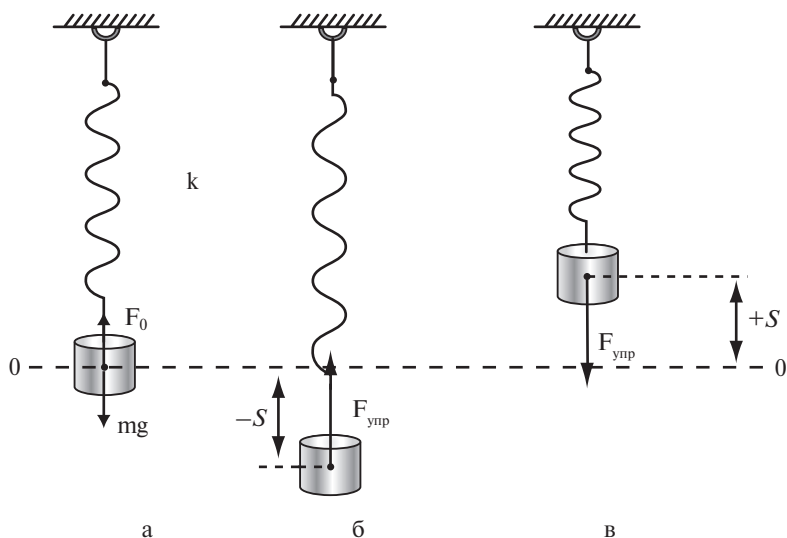


Рис. 1.1. Пружинный маятник: а — положение равновесия ($F_0=mg$); б — пружина растянута, смещение тела $-S$; в — пружина сжата, смещение тела $+S$

такую систему не действуют никакие внешние силы (вынуждающие или силы трения), то такие колебания совершаются по *гармоническому закону*. Если свободные колебания совершаются при действии сил трения, то они всегда являются *затухающими*.

Вынужденные — колебания, совершаемые системой под действием внешней периодически изменяющейся силы.

Автоколебания — всегда вынужденные колебания, но моменты воздействия внешней вынуждающей силы регулируются самой колеблющейся системой.

1.1. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Гармонические колебания — это самый простой вид колебаний, характеризующийся тем, что смещение колеблющейся точки совершается по закону синуса либо косинуса.

Рассмотрим вертикально расположенную пружину, один конец которой закреплен, а на другой подвешено тело массой m (рис. 1.1, а).

В этом положении начальная упругая сила F_0 и сила тяжести mg равны, и тело находится в состоянии покоя. Если пружину растянуть (рис. 1.1, б) или сжать (рис. 1.1, в) на некоторое расстояние S , то на тело будет действовать сила упругости, вызванная смещением тела.

Для небольших деформаций пружины справедлив закон Гука:

$$F_{\text{упр}} = -ks,$$

где k — коэффициент упругости пружины; s — смещение тела относительно положения равновесия. Упругая сила всегда направлена в сторону положения равновесия и противоположно смещению тела. Поэтому в формуле ставится знак «—». Так как смещения тела отсчитываются от положения равновесия (уровень 0—0 на рис. 1.1), то постоянную составляющую смещения за счет силы тяжести mg учитывать не следует.

Тогда, с учетом второго закона Ньютона, можно записать уравнение движения тела:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -ks. \quad (1.1)$$

Введем замену:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.2)$$

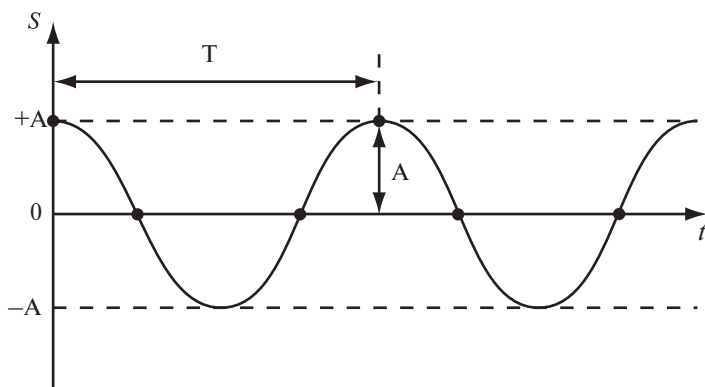


Рис. 1.2. График гармонического колебания; S — смещение тела; t — время; A — амплитуда колебаний; T — период колебаний

и, разделив обе части уравнения (1.1) на m , получим линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0. \quad (1.3)$$

Решение уравнения (1.3):

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

где A — амплитуда колебания — максимальное смещение тела от положения равновесия;

ω_0 — круговая частота колебаний, $\omega_0 = 2\pi\nu$;

ν — частота в герцах [Гц, с^{-1}], — количество колебаний за 1 с;

$\omega_0 t + \varphi_0$ — текущая фаза колебаний; она определяет положение тела на данный (любой выбранный) момент времени;

φ_0 — начальная фаза колебания, — определяет положение тела в момент $t = 0$.

Амплитуда и начальная фаза колебаний зависят от условий, при которых началось движение тела, в частности от положения тела и его скорости в момент $t = 0$.

Время, за которое совершается одно полное колебание, называется периодом колебаний T .

Период и частота связаны соотношением:

$$T = 1/\nu \text{ или } T = 2\pi/\omega_0, \quad (1.5)$$

где ω_0 — собственная частота гармонического колебания. Эта величина имеет глубокий физический смысл. Из выражения (1.2) следует, что ω_0 определяется только параметрами колебательной системы, в данном случае коэффициентом упругости пружины k и массой прикрепленного к ней тела m . Важно, что собственная частота не зависит от того, как в начальный момент $t = 0$ тело было выведено из равновесия: дали ему большое или малое начальное смещение; сильно или слабо толкнули тело в этот момент. Во всех случаях собственная частота будет одной и той же.

Энергия колебательной системы (гармонического осциллятора) складывается из потенциальной $E_{\text{п}}$ и кинетической $E_{\text{к}}$ энергий:

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{ks^2}{2} + \frac{mv^2}{2}. \quad (1.6)$$

Тогда, с учётом (1.4) , мгновенное значение потенциальной энергии:

$$E_{\text{п}} = \frac{kA^2}{2} \cos^2 (\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.7)$$

а мгновенное значение кинетической энергии:

$$E_{\text{к}} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2} \sin^2 (\omega_0 t + \varphi_0).$$

Учитывая (1.2) последнее выражение, можно представить:

$$E_{\text{к}} = \frac{kA^2}{2} \sin^2 (\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1.8)$$

Тогда значение полной энергии системы из (1.6; 1.7 и 1.8):

$$E = \frac{kA^2}{2} [\cos^2 (\omega_0 t + \varphi_0) + \sin^2 (\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Из курса тригонометрии известно, что выражение в квадратных скобках равно единице, а следовательно:

$$E = \frac{kA^2}{2}. \quad (1.9)$$

Из формул (1.7) и (1.8) следует, что потенциальная и кинетическая энергии меняются во времени, и их величины смещены по фазе: когда потенциальная энергия максимальна, кинетическая равна нулю и наоборот, когда потенциальная энергия равна нулю, кинетическая — максимальна. Однако полная энергия с учётом (1.2):

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2}, \quad (1.10)$$

остаётся постоянной $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \text{const.}$

Постоянство полной энергии при гармонических колебаниях вытекает из того, что при таких колебаниях отсутствуют какие-либо внешние воздействия: нет вынуждающей силы, и не учитываются силы трения.

1.2. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Свободные колебания характеризуются тем, что на колеблющееся тело не действуют внешние вынуждающие силы. Если при этом не учитывать силу трения, то такие колебания подчиняются гармоническому закону. Эти колебания не затухают со временем, и их амплитуда постоянна. Однако в реальных системах всегда присутствуют силы трения (сопротивления). Действие этих сил приводит к уменьшению энергии системы. А так как при свободных колебаниях нет источников, восполняющих уменьшение энергии, такие колебания будут обязательно затухать.

В простейшем случае сила трения пропорциональна скорости:

$$F_{\text{тр}} = -r\upsilon = -r \frac{dS}{dt}, \quad (1.11)$$

где r — коэффициент трения; $\upsilon = dS/dt$ — скорость тела; знак «—» указывает, что сила трения всегда направлена противоположно вектору скорости. Тогда уравнение движения примет вид:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = -ks - r \frac{dS}{dt}. \quad (1.12)$$

Введем обозначения:

$$2\beta = r / m \text{ и } \omega_0^2 = k / m. \quad (1.13)$$

Подставив их в (1.12), получаем дифференциальное уравнение затухающих колебаний в виде линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dS}{dt} + \omega_0^2 S = 0. \quad (1.14)$$