

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Ю.І. ПОСУДІН

БІОФІЗИКА

Підручник

Київ
Видавництво Ліра-К
2017

ББК 22.3
УДК 53(075.8)
П 63

Копіювання, сканування, запис на електронні носії тощо, будь-якої частини підручника без дозволу видавництва заборонено.

Рецензенти:

Рохманов М.Я. — доктор фіз.-мат. наук, завідувач кафедри фізики і агрометеорології Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва;

Відьмаченко А.П. — доктор фіз.-мат. наук, професор, зав. відділом фізики тіл сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України;

Придубський Ю.І. — доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри біофізики Національного університету ім. Тараса Шевченка.

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету біоресурсів і природокористування України
(протокол № 7 від 23 грудня 2015 р.)*

Посудін Ю.І.

П 63 Біофізика: підручник. — К.: Видавництво Ліра-К, 2017. — 472 с.

ISBN 978-617-7320-25-7

У підручнику наведені основні положення, закони та теорії з курсу загальної фізики для студентів ветеринарних, сільськогосподарських, екологічних, лісогосподарських та інших спеціальностей, для яких фізика не є домінуючою дисципліною, але які мають справу з вивченням живих організмів та оточуючого їх середовища. Підручник може бути також використаний студентами біологічних, медичних та педагогічних спеціальностей.

Розглянуто фізичні процеси, що відбуваються у живому організмі, та механізми, які становлять основу життєдіяльності людини, тварини та рослини під впливом навколишнього середовища. Викладено проблеми дії зовнішніх фізичних факторів на живі організми та їх здатності реагувати на ці фактори. Приділено увагу принципам дії та можливим застосуванням сучасних фізичних методів та приладів у практичній діяльності майбутнього спеціаліста.

Підручник містить приклади розв'язування практичних біофізичних проблем, контрольні завдання для перевірки засвоєння матеріалу студентами та контрольні запитання, відповіді на які студенти зможуть дати у разі ознайомлення із відповідними розділами підручника. Довідковий матеріал представлений у додатку.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів.

ББК 22.3
УДК 53(075.8)

ISBN 978-617-7320-25-7

© Посудін Ю.І., 2016
© Видавництво Ліра-К, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
1. ВСТУП	5
1.1. Фізичні величини	5
1.2. Стандарти довжини, маси та часу	5
1.3. Густина	7
1.4. Скаляри і вектори	10
1.4.1. Дії над векторами	10
1.4.2. Скалярний та векторний добутки	12
2. МЕХАНІКА	14
2.1. Основні визначення	14
2.2. Кінематика	14
2.2.1. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла	14
2.2.2. Кінематика руху матеріальної точки по колу	17
2.3. Динаміка	18
2.3.1. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла	18
2.3.2. Закон збереження імпульсу замкнутої системи	19
2.3.3. Центр мас та закон його руху	20
2.3.4. Реактивний рух у природі	21
2.4. Сили тяжіння	22
2.4.1. Закон всесвітнього тяжіння	22
2.4.2. Гравітаційне поле	24
2.4.3. Гравітація та живі організми	24
2.4.4. Вага тіла	25
2.5. Пружні сили	26
2.5.1. Деформації твердого тіла	26
2.5.2. Закон Гука	27
2.5.3. Вимірювання модуля Юнга	31
2.5.4. Потенціальна енергія пружно-деформованого тіла	33
2.5.5. Пружні властивості біологічних матеріалів	33
2.6. Сили тертя	37
2.7. Сили, що виникають під час криволінійного руху	38
2.8. Робота, потужність та енергія	39
2.8.1. Робота постійної сили	39
2.8.2. Робота змінної сили	39

2.8.3. Потужність	40
2.8.4. Консервативні сили	40
2.8.5. Енергія	41
2.8.6. Енергія та обмін речовин	42
2.9. Кінематика і динаміка обертального руху твердого тіла.....	43
2.9.1. Кінематичні характеристики обертального руху	43
2.9.2. Динамічні характеристики обертального руху	44
2.9.3. Основне рівняння динаміки обертального руху	46
2.9.4. Закон збереження моменту імпульсу.....	47
2.9.5. Вимірювання параметрів вітру.....	50
2.9.6. Вітроенергетика	50
2.10. Статика твердого тіла.....	51
2.10.1. Умови статичної рівноваги	51
2.10.2. Важіль. Умови рівноваги важеля	52
2.10.3. Опорно-руховий апарат тварини.....	53
3. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ	55
3.1. Механорецептори шкіри	55
3.1.1. Тактильна чутливість	55
3.1.2. Вестибулорецепція	56
3.1.3. Інтерорецепція	57
3.1.4. Тигмонастичні рухи рослин.....	58
4. МЕХАНІКА РІДИННИХ ТА ГАЗОВИХ ПОТОКІВ	62
4.1. Тиск.....	62
4.1.1. Визначення тиску	62
4.1.2. Атмосферний тиск	62
4.1.3. Тиск води.....	64
4.1.4. Закон Архімеда	64
4.1.5. Методи вимірювання тиску	65
4.2. Гідродинаміка	68
4.2.1. Рух ідеальної рідини.....	68
4.2.2. Рух в'язкої рідини.....	71
4.2.3. Ламінарна і турбулентна течія	72
4.2.4. Закон Гагена-Пуазейля.....	72
4.2.5. Седиментація.....	73
4.2.6. Ультрацентрифугування	75
4.3. Основи гемодинаміки.....	77
4.3.1. Склад крові.....	77
4.3.2. Фізичні принципи вимірювання швидкості осідання еритроцитів.....	78
4.3.3. Фізичні принципи захворювань кровоносних судин	80

4.4. Робота серця.....	81
4.5. Тиск крові.....	82
4.5.1. Артеріальний тиск.....	82
4.5.2. Вимірювання тиску крові.....	83
4.5.3. Сучасні прилади для вимірювання тиску.....	84
4.6. Поверхневий натяг.....	85
4.7. Капілярні явища.....	88
4.8. Аеродинаміка.....	91
4.8.1. Атмосферні частинки.....	91
4.8.2. Рух атмосферних частинок.....	92
4.8.3. Аеродинаміка пташиного польоту.....	96
5. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ.....	99
5.1. Механічні коливання.....	99
5.2. Основні характеристики гармонічного коливання.....	100
5.3. Енергія механічних гармонічних коливань.....	101
5.4. Математичний маятник.....	102
5.5. Згасаючі коливання.....	104
5.6. Вимушені коливання.....	104
5.7. Біжуча хвиля.....	105
5.8. Стояча хвиля.....	106
5.9. Биття коливань.....	107
5.10. Розкладання складних коливань у ряд Фур'є.....	108
5.11. Механічні коливання антропогенного та природного походження.....	109
5.11.1. Вібрації.....	109
5.11.2. Вплив вібрацій на живі організми.....	110
5.11.3. Землетруси.....	111
5.12. Коливальні процеси у природі.....	113
5.12.1. Екологічна модель Вольтерра–Лотка.....	113
5.12.2. Утворення колоній колективними амебами.....	117
6. АКУСТИКА.....	120
6.1. Хвилі в пружному середовищі.....	120
6.2. Звук та його характеристики.....	121
6.2.1. Енергія, інтенсивність та тиск звукових коливань.....	121
6.2.2. Рівень інтенсивності звукових коливань.....	123
6.2.3. Суб'єктивні характеристики звукових хвиль.....	124
6.2.4. Резонансні явища.....	124
6.2.5. Ефект Допплера.....	126
6.2.6. Падіння звукової хвилі на межу поділу двох середовищ.....	128

6.2.7. Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку в навколишньому середовищі	129
6.3. Ультразвук та його характеристики.....	130
6.3.1. Генерація ультразвуку.....	130
6.3.2. Поглинання та глибина проникнення ультразвуку	131
6.3.3. Розбіжність ультразвукової хвилі в середовищі.....	133
6.4. Інфразвук.....	133
6.5. Шум.....	134
6.5.1. Розподіл шуму за інтенсивністю.....	134
6.5.2. Сумарний шум	135
6.5.3. Розподіл шуму за частотою	135
6.5.4. Шумове забруднення.....	136
6.5.5. Вимірювання рівнів шуму	137
6.6. Основи біологічної акустики.....	138
6.6.1. Утворення звуків тваринами	138
6.6.2. Акустична комунікація тварин.....	139
6.6.3. Ультразвук у тваринному світі.....	140
6.7. Вплив акустичних стимулів на живі організми.....	140
6.7.1. Механізми впливу ультразвуку на біологічні об'єкти.....	140
6.7.2. Вплив інфразвуку на живі організми.....	141
6.8. Акусторецепція	141
6.9. Прикладна акустика	146
6.9.1. Застосування акустичних сигналів штучного походження	146
6.9.2. Застосування ультразвуку в медицині.....	147
7. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА.....	149
7.1. Ідеальний газ	149
7.2. Молекулярно-кінетична теорія газів	151
7.3. Молекулярна інтерпретація температури	152
7.4. Ізопроееси	153
7.5. Розподіл молекул за швидкостями.....	154
7.6. Середня довжина вільного пробігу молекул.....	155
7.7. Випаровування та конденсація.....	156
7.8. Реальний газ	156
7.9. Вологість повітря.....	158
7.9.1. Характеристики вологості повітря.....	158
7.9.2. Методи вимірювання вологості повітря.....	159
7.10. Осмос	164
7.11. Аромат продуктів	166
7.12. Нюх і смак.....	167
7.12.1. Нюх	167

7.12.2. Нюховий аналізатор	169
7.12.3. Механізми нюху	169
7.12.4. Методи аналізу запахів	170
7.12.5. Смак	172
7.12.6. Смаковий аналізатор	172
7.13. Принципи фіторемедіації.....	173
8. ТЕРМОДИНАМІКА.....	176
8.1. Температура і теплове розширення тіл	176
8.1.1. Температура	176
8.1.2. Температурні шкали	176
8.1.3. Одиниці температури	178
8.1.4. Температура атмосфери	179
8.1.5. Теплове розширення тіл.....	181
8.2. Вимірювання температури	182
8.3. Термодинаміка рівноважних станів.....	187
8.3.1. Параметри термодинамічної системи.....	187
8.3.2. Внутрішня енергія системи	188
8.3.3. Теплоємність та питома теплоємність.....	188
8.3.4. Робота та енергія.....	189
8.3.5. Перший закон термодинаміки	190
8.3.6. Застосування першого закону термодинаміки до певних термодинамічних процесів	192
8.3.7. Ентальпія. Закон Гесса	193
8.3.8. Тепловий двигун	195
8.3.9. Цикл Карно.....	195
8.3.10. Другий закон термодинаміки	199
8.3.11. Ентропія та її властивості	200
8.3.12. Ентропія та неупорядкованість	204
8.4. Термодинаміка необоротних процесів	205
8.4.1. Стаціонарний стан	205
8.4.2. Зміна ентропії.....	206
8.4.3. Продукція ентропії	207
8.4.4. Локальна продукція ентропії.....	208
8.5. Нерівноважна термодинаміка.....	209
8.5.1. Дисипативна функція	209
8.5.2. Явища перенесення	209
8.5.3. Перенесення маси (дифузія)	211
8.5.4. Перенесення маси (об'ємний потік води)	213
8.5.5. Перенесення теплоти (теплопровідність).....	214
8.5.6. Перенесення теплоти (конвекція)	215

8.5.7. Перенесення імпульсу (в'язкість)	217
8.5.8. Принцип симетрії феноменологічних коефіцієнтів	218
8.5.9. Теорема Пригожина	219
9. ЕЛЕКТРИКА	222
9.1. Електростатика	222
9.1.1. Електричний заряд. Властивості електричних зарядів	222
9.1.2. Закони електричного поля	223
9.1.3. Напруженість електричного поля	223
9.1.4. Електричний диполь	225
9.1.5. Рух зарядженої частинки в однорідному електричному полі	226
9.1.6. Осцилограф	226
9.1.7. Електричний потік	227
9.1.8. Теорема Остроградського–Гаусса	228
9.1.9. Циркуляція вектора напруженості електростатичного поля	230
9.1.10. Потенціал електростатичного поля	231
9.1.11. Електростатичний уловлювач	233
9.1.12. Іонний мікроскоп	233
9.1.13. Провідники в електростатичному полі	235
9.1.14. Діелектрики в електростатичному полі	236
9.1.15. Електрична ємність	238
9.2. Постійний електричний струм	240
9.2.1. Електричний струм	240
9.2.2. Електричне коло	241
9.2.3. Аналоги опорів у рослинному організмі	243
9.2.4. Закони постійного струму	244
9.2.5. Термоелектричні явища	247
9.2.6. Електричні прилади	250
10. ЕЛЕКТРИЧНІ ПОЛЯ ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ	254
10.1. Іоносфера	254
10.2. Блискавки	256
10.3. Полярні сніжки	258
11. ЕЛЕКТРИЧНА АКТИВНІСТЬ ЖИВОГО ОРГАНІЗМУ	259
11.1. Біологічні потенціали	259
11.2. Техніка вимірювання мембранних струмів	262
11.3. Електрична активність серця. Принципи електрокардіографії	263

11.4. Електрична активність мозку. Принципи електроенцефалографії.....	265
11.5. Утворення електричних полів рибами.....	264
12. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ.....	267
12.1. Електрофорез.....	267
12.2. Вплив електричних полів антропогенного походження на живі організми.....	269
13. ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ.....	271
14. ПРИКЛАДНА ЕЛЕКТРИКА.....	272
14.1. Застосування електрофізичних методів у тваринництві.....	272
14.2. Методи електролікування.....	273
15. МАГНЕТИЗМ.....	277
15.1. Магнітне поле. Магнітна індукція.....	277
15.2. Сила лоренца.....	277
15.3. Закон Ампера.....	279
15.4. Закон повного струму для магнітного поля у вакуумі.....	280
15.5. Струм зміщення.....	281
15.6. Ефект Холла.....	282
15.7. Закон Біо-Савара-Лапласа.....	282
15.8. Магнітні властивості речовини.....	283
15.9. Магнітне поле Землі.....	285
15.10. Електромагнітна індукція.....	286
15.11. Рівняння Максвелла.....	289
15.12. Самоіндукція.....	290
15.13. Взаємоіндукція.....	291
15.14. Електричне коло змінного струму.....	292
15.15. Резонанс напруг.....	295
15.16. Електромагнітні коливання.....	295
15.17. Токамак.....	298
15.18. Великий адронний колайдер.....	299
16. МАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ.....	301
16.1. Джерела магнітного поля в живому організмі.....	301
16.2. Принципи магнітографії.....	301
17. ВПЛИВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ.....	303
18. МАГНІТОРЕЦЕПЦІЯ.....	304

19. ПРИКЛАДНИЙ МАГНЕТИЗМ	305
19.1. Методи магнітотерапії	305
20. ОПТИКА	307
20.1. Природа світла	307
20.2. Геометрична оптика	307
20.2.1. Основні закони геометричної оптики	308
20.2.2. Повне внутрішнє відбивання	309
20.2.3. Тонкі лінзи	311
20.2.4. Оптичний мікроскоп	314
20.2.5. Окуляр-мікромір і об'єкт-мікромір	315
20.2.6. Окулярний гвинтовий мікромір	316
20.3. Хвильова оптика	317
20.3.1. Світло як електромагнітна хвиля	317
20.3.2. Інтерференція світла	317
20.3.3. Методи спостереження інтерференції світла	319
20.3.4. Дифракція світла	321
20.3.5. Дифракційна решітка	324
20.3.6. Дисперсія світла	325
20.3.7. Принцип дії спектральних приладів	326
20.3.8. Поляризація світла	327
20.3.9. Методи одержання поляризованого світла	329
20.3.10. Оптична активність речовини	331
20.4. Квантова оптика	333
20.4.1. Квантова природа світла	333
20.4.2. Фотоелектричний ефект	333
20.4.3. Ефект Комптона	335
20.5. Квантові властивості випромінювання	337
21. ОСНОВИ ФОТОБІОЛОГІЇ	340
21.1. Параметри оптичного випромінювання	340
21.2. Сонячне випромінювання	340
21.3. Вплив оптичного випромінювання видимого діапазону на живі організми	342
21.4. Вплив оптичного випромінювання ультрафіолетового діапазону на живі організми	344
22. ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА	346
22.1. Фоторецепція у живих організмів	346
22.1.1. Фоторецепція у комах	346
22.1.2. Зоровий аналізатор риб	348
22.1.3. Зоровий аналізатор птахів	348

22.1.4. Зоровий аналізатор ссавців.....	349
22.1.5. Механізми зору ссавців.....	350
23. ПРИКЛАДНА ОПТИКА	353
23.1. Методи вимірювання сонячного випромінювання	353
23.1.1. Теплові детектори.....	353
23.1.2. Квантові детектори.....	355
23.2. Вимірювання кольору продуктів	355
23.2.1. Параметри кольору.....	355
23.2.2. Колориметрія	356
23.2.3. Спектрофотометр з $0^0/45^0$ геометрією	356
23.2.4. Колориметр зі сферичною геометрією	356
23.2.5. Застосування колориметричних методів.....	357
24. ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ	360
24.1. Корпускулярно-хвильовий дуалізм	360
24.2. Хвильові властивості частинок	360
24.3. Електронний мікроскоп	362
24.4. Співвідношення невизначеностей.....	363
24.5. Хвильова функція	364
24.6. Стационарне рівняння Шредингера.....	364
24.7. Лінійний гармонічний осцилятор	365
24.8. Скануючий тунельний мікроскоп	366
25. ЕЛЕМЕНТИ АТОМНОЇ ФІЗИКИ	369
25.1. Моделі атома.....	369
25.2. Атом водню	372
25.3. Принцип Паулі.....	375
25.4. Нанотехнологія та наномедицина	376
26. ОСНОВИ ФІЗИКИ ЛАЗЕРІВ	379
26.1. Лазер та принцип його дії.....	379
26.2. Характеристики лазерного випромінювання	383
26.3. Фокусування лазерного випромінювання	386
26.4. Застосування лазерів	386
26.4.1. Застосування лазерів у медицині	386
26.4.2. Лазерна діагностика	387
26.4.3. Лазерна терапія	389
26.4.4. Лазерна хірургія.....	390
26.4.5. Лазерні системи у дистанційному зондуванні навколишнього середовища	391
26.4.6. Лазери у керованому термоядерному синтезі.....	392

27. ОСНОВИ СПЕКТРОСКОПІЇ	393
27.1. Спектри атомів і молекул	393
27.1.1. Спектри атомів.....	393
27.1.2. Спектри молекул.....	393
27.1.3. Електронні рівні енергії.....	396
27.1.4. Коливальні рівні енергії.....	397
27.1.5. Обертальний рух молекул.....	398
27.1.6. Процеси дезактивації.....	399
28. ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА	401
28.1. Типи зв'язків у твердих тілах	401
28.1.1. Іонні кристали	401
28.1.2. Ковалентні кристали	402
28.1.3. Металеві кристали	402
28.2. Зонна теорія.....	402
28.3. Напівпровідники.....	405
28.4. Напівпровідникові прилади.....	406
28.4.1. Терморезистор	406
28.4.2. Напівпровідниковий діод.....	406
28.4.3. Напівпровідниковий тріод.....	407
28.4.4. Напівпровідниковий фотоприймач	408
28.4.5. Напівпровідниковий лазер.....	408
28.4.6. Моделювання фотосинтезу.....	408
29. ЯДЕРНА ФІЗИКА	411
29.1. Властивості атомного ядра	411
29.2. Ядерний спі́н та магнітний момент.....	411
29.3. Ядерний магнітний резонанс	412
29.4. Енергія зв'язку	416
30. ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ	417
30.1. Класифікація іонізуючого випромінювання	417
30.2. Радіоактивність	417
30.2.1. Радіоактивний розпад.....	417
30.2.2. Закон радіоактивного розпаду.....	418
30.3. Рентгенівське випромінювання.....	420
30.4. Дозиметрія іонізуючого випромінювання.....	421
30.4.1. Дози іонізуючого випромінювання.....	421
30.4.2. Поглинання іонізуючого випромінювання	423
30.5. Вимірювання іонізуючого випромінювання.....	424
30.5.1. Основні методи вимірювання іонізуючого випромінювання	424

30.5.2. Принципи γ -спектроскопії	429
30.6. Вплив іонізуючих випромінювань на живі організми	433
30.6.1. Механізми впливу іонізуючих випромінювань	433
30.6.2. Радіоактивні забруднення	433
31. РАДІОІЗОТОПИ	436
31.1. Атомне ядро та ізотопи	436
31.2. Радіоізотопи у медицині	436
31.3. Радіоізотопи та рослини	437
31.4. Утворення зображень	437
31.5. Ізотопна хронологія	439
ДОДАТКИ	441
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	449
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	454
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	460
ЗМІСТ	461