

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Біофізика в задачах та прикладах

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

УДК 577.3(075.8)

ББК 28.071я73

Б63

Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 4 від 12.05.2015 р.)

Рецензенти: *Г. П. Чуйко*, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
Чорноморський державний університет
імені Петра Могили
А. Г. Мисюра, д-р біол. наук, проф.,
Інститут прикладних проблем фізики і біофізики
НАН України

Відповідальний редактор *М. В. Філіпцова*, канд. техн. наук, доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Б63 **Біофізика** в задачах та прикладах : навч. посіб. / В. С. Антонюк,
Г. С. Тимчик, М. О. Бондаренко та ін. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. –
208 с. – Бібліогр. : с. 195–197. – 50 пр.
ISBN 978-966-622-704-4

Розглянуто основні теоретичні відомості з біомеханіки, термодинаміки біологічних процесів та систем, молекулярної біофізики, біофізики складних біологічних систем, біосфери та фізичних полів живого організму. Подано тестові та теоретичні завдання, які розраховані на повний курс дисципліни «Біофізика і біомеханіка».

Для студентів, магістрів та аспірантів спеціальності «Медичні прилади та системи» вищих технічних навчальних закладів. Може бути корисний викладачам вищих технічних навчальних закладів, науковим співробітникам та фахівцям, що спеціалізуються в галузі медичного приладобудування.

УДК 577.3(075.8)
ББК 28.071я73

ISBN 978-966-622-704-4

© В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик,
М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко,
Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь,
А. М. Рубан, 2015
© НТУУ «КПІ» (ПБФ), 2015

З М І С Т

Передмова	6
Вступ	7
Вказівки до розв'язання практичних завдань	11
1 ОСНОВИ БІОМЕХАНІКИ	14
1.1. Основні теоретичні відомості	14
1.2. Приклади розв'язання типових завдань	33
1.3. Задачі для самостійного розв'язання	37
1.3.1. Фізико-механічні властивості біологічних тканин	37
1.3.2. Механіка опорно-рухового апарату людини	38
1.3.3. В'язкий плин в медико-біологічних системах. Капілярні явища в біофізиці	39
1.3.4. Коливально-обертвий рух біологічних об'єктів. Біофізика звукових коливань	40
1.4. Контрольні питання	41
2 ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ	43
2.1. Основні теоретичні відомості	43
2.2. Приклади розв'язання типових завдань	51
2.3. Задачі для самостійного розв'язання	55
2.3.1. Основні закони рівноважної термодинаміки в біосистемах ..	55
2.3.2. Термодинамічні потенціали. Хімічний та електрохімічний потенціал	56
2.3.3. Основи нерівноважної термодинаміки	57
2.4. Контрольні питання	58
3 МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА	60
3.1. Основні теоретичні відомості	60
3.2. Приклади розв'язання типових завдань	73
3.3. Задачі для самостійного розв'язання	76
3.3.1. Основи молекулярної біофізики	76

3.3.2.	Дифузійні явища в біологічних системах	77
3.3.3.	Біологічні мембрани Транспорт речовини через біологічні мембрани	78
3.3.4.	Біофізика нервового імпульсу. Потенціал спокою та потенціал дії	79
3.4.	Контрольні питання	80
4	БІОФІЗИКА СКЛАДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	83
4.1.	Основні теоретичні відомості	83
4.2.	Приклади розв'язання типових завдань	102
4.3.	Задачі для самостійного розв'язання	107
4.3.1.	Математичне моделювання складних біологічних систем ...	107
4.3.2.	Біофізика зорової системи людини та тварин	108
4.3.3.	Біофізика системи кровообігу. Основні закони гемодинаміки	109
4.3.4.	Газообмін у легенях і тканинах. Робота дихання	110
4.4.	Контрольні питання	112
5	БІОСФЕРА ТА ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЖИВОГО ОРГАНІЗМУ ...	114
5.1.	Основні теоретичні відомості	114
5.2.	Приклади розв'язання типових завдань	137
5.3.	Задачі для самостійного розв'язання	143
5.3.1.	Організми в електричному та магнітному полях	143
5.3.2.	Дія теплових полів на біологічні об'єкти	144
5.3.3.	Дія йонізуючого випромінювання на організми	146
5.3.4.	Оптичні методи дослідження біологічних об'єктів	147
5.4.	Контрольні питання	149
6	ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ	152
6.1.	Варіанти тестових завдань за розділами	150
6.1.1.	Основи біомеханіки	150
6.1.2.	Термодинаміка біологічних процесів та систем	158

6.1.3. Молекулярна біофізика	167
6.1.4. Біофізика складних біологічних систем	177
6.1.5. Біосфера та фізичні поля живого організму	185
6.2. Відповіді на тестові завдання	193
Перелік літературних джерел	195
Довідникові данні та фізичні константи	198

ПЕРЕДМОВА

Викладання біофізики в університетах технічного напрямку здійснюється на основі біологічної або фізичної освіти. Завдання ж загального курсу дисципліни «Біофізика і біомеханіка» полягає у виявленні фізичних механізмів в біологічних явищах шляхом розкриття загальних молекулярних механізмів взаємодій, які лежать в основі біологічних процесів з огляду на фізичні закони та основні принципи сучасної інженерної освіти.

Дисципліна «Біофізика і біомеханіка» достатньо складна і багатогранна, її викладання та розуміння вимагає залучення не лише знань з різних розділів біології та фізичної хімії, але й використання багатьох фізичних законів, а також правил та методів математики. Від студентів, які приступили до вивчення біофізики вимагаються знання, що лежать в основі цих дисциплін.

В навчальному посібнику широко наводяться практичні та тестові завдання не лише з існуючих університетських курсів з хімії, фізики, математики, фізичної хімії для студентів-електромеханіків, але й оригінальні завдання прикладної біофізики та біомеханіки. Алгоритм розв'язання цих завдань базується на конкретних прикладах, які приводяться у кожному розділі посібника.

Посібник написаний відповідно до програми курсу «Біофізика і біомеханіка» для студентів приладобудівних факультетів технічних університетів і орієнтований, головним чином, на підготовку спеціалістів-електромеханіків спеціальності «Медичні прилади та системи» напряму 6.051003 – «Приладобудування», які читаються студентам на 1-4 роках навчання. Посібник буде цікавий широкому колу читачів різного профілю, включаючи магістрів та аспірантів, а також наукових співробітників, які спеціалізуються в областях фізичної біології.

Все вищесказане узагальнює зміст посібника, який складається з шести розділів: основи біомеханіки; термодинаміка біологічних процесів та систем; молекулярна біофізика; біофізика складних біологічних систем; біосфера і фізичні поля людини та включає тестові завдання.

ВСТУП

Для зміцнення міждисциплінарних зв'язків, закріплення отриманих знань, формування умінь і навичок, студенти повинні не лише розуміти теоретичний (лекційний) матеріал, але й уміти плідно застосовувати отримані знання і навички у своїй практичній діяльності.

Усе це повною мірою відноситься до викладання такого важливого предмета, яким є біофізика.

Особливе значення в накопиченні дієвих знань мають практичні заняття студентів і зокрема виконання ними фізичного практикуму.

У посібнику включені завдання, які дозволяють, з одного боку, повторити, поглибити та узагальнити основні питання пройденого курсу, а з іншого боку – дають можливість проводити практичні заняття на новому, вищому експериментально-методичному рівні.

Таким чином, набуті навички не будуть відірвані від отриманих теоретичних знань по біофізиці.

Завдання посібника:

- навчання методам і прийомам застосування теоретичних відомостей, що отримувалися на лекційних заняттях до реалізації конкретних практичних завдань;

- навчання методам і техніці проведення самостійних фізичних розрахунків;

- теоретично-розрахункова перевірка основних фізичних законів;

- навчання прийомам і методам розрахунку, обробки і оформлення практичних результатів: порядок проведення розрахунків, їх оформлення та представлення у вигляді таблиць, графіків;

- повторення і поглиблення пройденого лекційного матеріалу.

Мета посібника: розробити дидактичну модель посібника з біофізики та біомеханіки для студентів інженерних спеціальностей і створити на її основі систему практичних завдань із застосуванням лекційного матеріалу та розділів підручника з біофізики та біомеханіки.

Підготовка студентів. Навчальний посібник доцільно використовувати після того, як студенти набули достатні знання матеріалу, що вивчається, і зможуть розібратися в методах розв'язання практичних завдань. Підготовка до практичних занять проводиться поступово, системно, протягом усього навчального семестру.

Студенти повинні вести окремі зошити, до яких вносяться основні теоретичні матеріали (закони, формули та пояснення до них), розв'язок типових завдань та порядок виконання практичного завдання із заданого розділу навчального посібника.

Перед практичним заняттям студент отримує від викладача інструкцію, за якою можна заздалегідь підготуватися до виконання роботи. В інструкцію, як правило, включається зміст і порядок виконання роботи, методика розрахунків та оформлення їх результатів.

Інструкція містить наступні елементи:

- короткі відомості з теорії питання, що вивчається;
- алгоритм виконання роботи (на прикладі розв'язання типового завдання);
- порядок оформлення результатів розрахунків;
- додаткові питання або розрахункові завдання.

У вступній бесіді викладачем звертається увага студентів на правильність та точність проведення розрахунків (кожне обчислення виконується приблизно, з мірою точності, що задовольняє практичним або науковим цілям). Причому кількість знаків розрахованої величини після коми повинна відповідати мірі точності вихідної величини, яка має максимальну точність.

У вступній бесіді також слід сказати про порядок оформлення письмового звіту. Зміст звіту має повний текст завдання, а також його коротку форму запису (з позначенням усіх заданих величин та необхідних для розв'язання констант викладених в системі СІ), блок розв'язку зі схематичним рисунком при необхідності надання пояснення до розрахункових формул.

Розв'язок завдання має містити усі необхідні розрахункові формули із зазначенням основних законів із яких ці формули отримані.

Допускається в процесі розписування формульного виразу, з метою спрощення вигляду формули, проводити проміжні розрахунки.

В кінці розрахунків по практичному завданню наводиться розгорнута відповідь із зазначенням шуканої величини, її значення (наведене із заданою точністю – див. вище) та одиниці її вимірювання в системі СІ.

При необхідності відповідь можуть супроводжувати пояснення до результатів розв'язку (фізичний зміст знаку « \rightarrow » у формулі, нульове значення результату тощо).

Методика проведення занять. Спостереження за активністю роботи окремих студентів на практичному занятті дозволяють викладачеві встановити, хто зі студентів підготувався краще (володіє теорією, ясно представляє хід розв'язання завдання, знає правильний розв'язок) і хто підготувався недостатньо.

Крім того, викладач має відслідковувати, хто зі студентів виконує роботу ретельно і акуратно, прагнучи досягнути результату, а хто веде її поспішно, без належної підготовки, а іноді без розуміння основної суті справи, формально.

Усе це дає викладачеві матеріал, необхідний для подальшого покращення організації практичних занять і для правильної оцінки успішності кожного студента.

Оцінка знань студентів на практичних заняттях є вкрай важливою і належить до суттєвих сторін методики ведення занять. Ця оцінка складається з результатів перевірки студентських звітів з практичних занять, самостійної роботи студента біля дошки та з результатів спостереження викладача, оскільки в оцінку повинна входити не лише якість звіту, але й якість усієї практичної роботи, проведеної студентом в ході виконання завдань посібника.

Звіти перевіряються викладачем в кінці кожного змістовного модуля, що дозволяє останньому адекватно та об'єктивно оцінити рівень знань студентів по ходу викладання окремих розділів дисципліни.

При цьому викладач вносить до звіту свої виправлення або зауваження, а потім оцінює практичну роботу в цілому.

Така загальна оцінка знань має за мету відсторонити студентів від формального відношення, примушує знати фізичну суть завдання, приділяти увагу правильному і раціональному алгоритму розв'язання, виховує ощадливість і акуратність.

Взаємодія викладача зі студентом. Головна мета, яка ставиться нині в освіті – зміна технології взаємодії викладача зі студентом.

Завдання викладача – максимально розкрити і поглибити біофізичні знання студента, спонукати його до самодисципліни, самостійної підготовки та самооцінки.

У своїй навчально-методичній діяльності викладач має обирати наступне:

- не передавати знання, а організовувати процеси діяльності, в яких створювати і користуватися надбаними знаннями та навичками;
- розвивати логіку пізнання студентів;
- розвивати уміння імпровізації та аналізу нових нестандартних ситуацій, будувати власні унікальні дії в конкретних ситуаціях;
- розвивати розуміння різних ситуацій (навчально-педагогічних, науково-експериментальних, тощо).

У спілкуванні зі студентами слід вибирати позицію співпраці, демократичний стиль спілкування, який ґрунтується на пошані особи партнерів по спілкуванню, можливості вільного висловлювання своїх позицій і думок.

Студент на різних етапах роботи повинен показати свої знання і уміння при самостійному виконанні робіт практичного заняття.

У разі незадовільного результату або пропуску з поважної причини має надаватися можливість на повторне виконання роботи.

Якщо студент показує задовільний або хороший результат, підсумкову оцінку слід підвищити на один бал.

ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Процес вивчення дисципліни «Біофізика та біомеханіка» складається з наступних етапів:

- 1) опрацювання оглядових лекцій;
- 2) самостійна робота над підручниками та навчальними посібниками;
- 3) виконання контрольних робіт;
- 4) проходження лабораторного практикуму;
- 5) здача заліку та/або іспиту.

В процесі вивчення курсу дисципліни студент має виконати 19 практичних завдань.

Варіант завдання визначається останньою цифрою номера залікової книжки студента.

Варіант	Номера контрольних завдань																		
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151	161	171	181
2	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142	152	162	172	182
3	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143	153	163	173	183
4	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154	164	174	184
5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185
6	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146	156	166	176	186
7	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147	157	167	177	187
8	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148	158	168	178	188
9	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189

При виконанні контрольного завдання студент повинен керуватися наступним:

1. Кожне завдання виконується в окремому зошиті шкільного типу, на лицьовій стороні якої наводяться наступні відомості:

**Звіт виконання практичних завдань
з дисципліни «Біофізика та біомеханіка»**

Варіант № ____

Виконав:

Студент групи _____

Перевірив:

викладач кафедри _____

(п.п.)

(п.п.)

Номер зал.книжки _____

2. Перш ніж приступити до виконання завдання корисно проглянути приклади розв'язання завдань, приведених перед відповідним блоком практичних завдань.
3. Завдання виконується письмово, із залишенням полів для зауважень викладача. Кожне нове завдання повинне розпочинатися з нової сторінки.
4. Умова завдання переписується повністю, без будь-яких скорочень.
5. Креслення, схеми або рисунки, що пояснюють умову завдання або його розв'язку, повинні виконуватися акуратно із застосуванням креслярського приладдя.
6. Обчислення при розв'язанні завдань необхідно виконувати в одиницях системи СІ.
7. При розв'язуванні завдань слід надавати словесне формулювання вживаних законів і вказувати на значення літерних позначень, наведених у формулах. Розв'язок супроводжують короткими, але вичерпними поясненнями.
8. Як правило, завдання слід розв'язувати в загальному вигляді, підставляючи числові значення лише в остаточну формулу.
9. При підстановці в розрахункову формулу, а також при записі відповіді числові значення величин слід записувати як добуток десяткового дробу з однією значущою цифрою перед комою на відповідну міру десяти. Наприклад, замість 3520 потрібно записати $3,52 \cdot 10^3$, замість 0,00129 записати $1,29 \cdot 10^{-3}$ тощо.

10. Відповідь на теоретичне запитання має бути:

- результатом уважного прочитання теми по декількох підручниках;
- коротким конспектом по темі;
- точною;
- чіткою;
- такою, що показує його розуміння.

Вона повинна розкривати не лише визначення питання, але й містити конкретні приклади застосування цього фізичного явища у біології, медицині, анатомії.

Відповідь на теоретичне питання не має бути:

- від слова до слова списана з підручника;
- обмежена тільки визначенням або визначеннями.

11. Відповідь на якісне завдання повинна містити міркування, які підтверджуються фізичними закономірностями (тобто аргументованою).

12. Якщо контрольне завдання рецензентом не зараховане, студент зобов'язаний представити його на повторну рецензію, зробивши в тому ж зошиті необхідні виправлення.

13. Студент має бути готовий дати пояснення по суті розв'язання завдань на заліку або іспиті.

1. ОСНОВИ БІОМЕХАНІКИ

В розділі розглядаються практичні завдання, що передбачають розрахунок та дослідження механічних властивості живих тканин, органів та організму в цілому, а також механічні явища, які відбуваються в організмі [1-6, 15, 29].

В розділі також пропонуються завдання по розрахунку в'язкого плинну в медико-біологічних системах та явищах, що мають місце в біологічних капілярах та тонких судинах [16, 17].

Завершує розділ блок завдань, що стосується коливально-обертового руху біологічних об'єктів, в тому числі й звукових коливань [2, 24, 26].

1.1. Основні теоретичні відомості

Фізико-механічні властивості матеріалів. Основні закони біомеханіки.

Серед усіх фізико-механічних властивостей біологічних матеріалів слід виділити такі: теплове розширення, еластичність, пружність та пластичність.

Теплове розширення твердих тіл – це зміна геометричних розмірів (об'єму) тіла внаслідок зміни його температури.

Ця властивість характерна для усіх речовин. Коли речовина нагрівається, її частинки починають інтенсивніше рухатися, що приводить до збільшення середніх відстаней між ними.

Більшість тіл збільшують свій об'єм в результаті зростання температури, однак відомо декілька винятків. Найвідомішими прикладами відхилення від правила є вода та чистий кремній, які в діапазоні від 0 °С до 4 °С (вода) та в діапазоні від -255 °С до -153 °С (кремній) зменшує свій об'єм при зростанні температури.

Розділ метрології, що вивчає властивості та методи вимірювання теплового розширення має назву дилатометрія, а прилад для визначення параметрів теплового розширення – дилатометр.

Ступінь розширення речовини віднесений до зміни температури називається коефіцієнтом теплового розширення, що в цілому залежить від температури:

Коефіцієнт теплового розширення:

$$\Delta l = l_1 \alpha \Delta t \text{ [м]}; l_2 = l_1 (1 + \alpha \Delta t) \text{ [м]}, \quad (1)$$

де l_1 – початкова довжина тіла [м] при температурі t_1 [К]; l_2 – кінцева довжина тіла [м] при температурі t_2 [К]; $\Delta l = l_2 - l_1$ – видовження тіла [м]; $\Delta t = t_2 - t_1$, – різниця температур [К]; α – температурний коефіцієнт лінійного розширення [К⁻¹].

Значення коефіцієнтів теплового розширення для деяких матеріалів наведені в Додатках.

Еластичність біологічної тканини – це фізична величина, яка характеризує зміну абсолютної деформації цієї тканини до механічного навантаження і яка показує, на скільки зміниться ця деформація у разі зміни навантаження на 1%:

$$E = \frac{\Delta x}{\Delta F} \text{ [м/Н]}, \quad (2)$$

де Δx – зміна абсолютної деформації біотканини [м]; ΔF – механічне навантаження на біотканину [Н].

Відносна деформація тіла – це відношення видовження (скорочення) зразка до його початкового розміру:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0, \quad \varepsilon' = \frac{\Delta d}{d} = -\mu \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

де Δl – зміна довжини зразка під дією зовнішньої сили [м], l_0 – початкова довжина зразка [м], d – діаметр стрижня [м], μ – коефіцієнт Пуассона (більшість біологічних матеріалів, в тому числі і стінки кровоносних судин, майже не стискаються, тому для них коефіцієнт Пуассона $\mu \approx 1/2$.)

Механічне напруження – зусилля, що припадають на одиницю площі перетину тіла.

При вирішенні питання про міцність конструкції недостатньо знати тільки систему сил, що діють на цю конструкцію.

Необхідно знати ще розміри конструкції та матеріал, з якого вона виготовлена.

Напруження в загальному – це відношення сили, що діє по площадці до величини (площі) цієї площадки:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [Па]}, \quad (4)$$

де E – коефіцієнт пропорційності (модуль пружності, модуль Юнга) [Па],
 ε – відносна деформація].

Причинами виникнення напружень є дія зовнішніх сил, температурних полів (термічні напруження) чи проходження у матеріалі тіла фізико-хімічних процесів.

В той же час між деформаціями та механічними напруженнями існує лінійна залежність, яку встановлює закон Гука:

$$F = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \Delta l = k \cdot \Delta l \text{ [Н]}, \quad (5)$$

де E – коефіцієнт пропорційності (модуль пружності, модуль Юнга) [Па];
 S – площа поперечного перетину зразка [м^2]; l – початкова довжина зразка [м];
 Δl – зміна довжини зразка під дією зовнішньої сили [м]; k – коефіцієнт пружності [Н/м].

Враховуючи той факт, що більшість біологічних тканин мають властивості не лише пружні, але й пластичні, для них доцільніше застосовувати реологічну модель (модель Максвелла) пружнов'язкого тіла, яка утворена послідовним сполученням пружного і в'язкого елементів.

Якщо цю систему швидко навантажити, то в'язкий елемент не встигне зрушити з місця і буде поводити себе, як заморожений, а деформацію візьме на себе пружина – і модель буде поводити себе як пружне тіло.

І навпаки, у разі повільного навантаження, наприклад, сталою силою, до деякої невеликої постійної деформації пружини додається необмежено зростаюча деформація в'язкого елемента, тобто модель поводить себе як пружна рідина, яку називають рідиною Максвелла (а також тілом або моделлю Максвелла).

Ця рідина не описується законом в'язкості Ньютона і тому належить до неньютонівських рідин.

Експоненціальний закон релаксації напруження (модель Максвелла) описується наступним рівнянням:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\alpha}} \text{ [Па]}, \quad (6)$$

де t - постійна часу релаксації [с]; σ_0 - початкове напруження [Па].

Основним елементом в організмі людини та тварини, для якого притаманна така пружнов'язка деформація є м'яз.

Існує два режими скорочення м'яза: ізотопічне (змінюється довжина волокна, а напруження залишається незмінним) й ізометричне (кінці м'яза нерухомо закріплені, унаслідок чого змінюється не довжина, а напруження).

Важливими характеристиками роботи м'яза є сила і швидкість скорочення.

Рівняння Хілла, що зв'язує між собою силу та швидкість скорочення м'яза, має вигляд:

$$(P + a) \cdot (v + b) = (P_0 + a) \cdot b = a \cdot (v_{\max} + b), \quad (7)$$

де v – швидкість укорочення м'яза [м/с]; P – м'язова сила або прикладене до неї навантаження (зовнішня сила, яка діє на м'яз) [Н]; v_{\max} – максимальна швидкість укорочення м'яза ($v = v_{\max}$ при $P = 0$) [м/с]; P_0 – сила, яка розвивається м'язом в ізометричному режимі скорочення, тобто при такому навантаженні, при якому не відбувається зміна довжини м'яза ($P = P_0$ при $v = 0$) [Н]; a і b – константи.

Окрім силових характеристик матеріалів, слід також розглянути їх енергетичні характеристики, а саме: роботу, теплопродукцію та потужність м'язів, а також їх коефіцієнт корисної дії.

Робота, що здійснюється м'язом при його скороченні за час t :

$$A = P \cdot v \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (8)$$

де P – м'язова сила (зовнішня сила, яка діє на м'яз) [Н]; v – максимальна швидкість укорочення м'яза [м/с].

Теплопродукція м'яза (або вироблення теплоти в організмі в результаті енергетичних перетворень в живих клітинах, яке пов'язане з механічною роботою м'язів):

$$Q = a \cdot x \text{ [Дж]}. \quad (9)$$

де x – зміна довжини м'яза [м]; a – константа, що має розмірність сили [Н].

При повному спокої та при оптимальній температурі середовища людина середньої ваги й віку вивільняє близько 1 ккал (4,19 кДж) на 1 кг маси тіла за 1 годину.

Близько 50% всієї теплоти утвориться в органах черевної порожнини (головним чином у печінці), по 20% у кістякових м'язах і центральній нервовій системі й близько 10% при роботі органів дихання й кровообігу.

Загальна потужність, розвинута м'язом визначається швидкостями виконання м'язом роботи та виділення теплоти:

$$N_{\text{заг}} = \frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dt} = P \cdot v + \frac{dQ}{dt} = N_{\text{еіδ}} + \frac{dQ}{dt} \text{ [Вт]}, \quad (10)$$

де $N_{\text{кор}} = P \cdot v$ – корисна потужність [Вт].

Коефіцієнт корисної дії м'яза – є відношенням корисної, здійсненої м'язами потужності до їх загальної потужності:

$$\eta = \frac{N_{\text{еіδ}}}{N_{\text{заг}}} \cdot 100\% = \frac{P \cdot v}{P \cdot v + a \cdot v} \cdot 100\% \text{ [%]}. \quad (11)$$

ККД м'яза зберігає постійне значення (близько 40 %) в діапазоні значень сили від $0,2P_0$ до $0,8P_0$.

Протікання рідини. Біореологія.

Біореологія – наука про плинність та деформацію суцільних біологічних середовищ (наприклад, біологічних в'язких рідин та рідин аномальної в'язкості, біотканин, суспензій тощо).

В основі біореології лежать закони гідромеханіки та теорії пружності і пластичності (закон Ньютона для в'язкого тертя у рідинах, рівняння Нав'є-Стокса для руху нестисливої в'язкої рідини, закон Гука про опір деформуванню пружного тіла тощо).

Основне завдання біореології – встановити залежність між механічними напруженнями, що виникають в органічному об'єкті, і викликаними ними деформаціями та їх змінами в часі.

При цьому, основна увага звертається на складну реологічну поведінку біологічних речовини (наприклад, коли одночасно виявляються властивості в'язкі і пружні або в'язкі та пластичні).

Біореологія охоплює коло питань, що знаходяться у проміжку між питаннями, які розглядає теорія пружності ідеально пружних тіл і питаннями механіки ньютонівських рідин і до яких відносяться задачі, пов'язані з деформацією і потоками реальних біологічних матеріалів, що зустрічаються на практиці – від біологічних суспензій (наприклад, лімфа, кров) до сильно розріджених рідин (наприклад, пінистих матеріалів).

Зв'язок між швидкістю течії v , тиском p та висотою h певної точки в ідеальній рідині описується рівнянням Бернуллі (Даніель Бернуллі, 1738 рік).

Рівняння Бернуллі для точок ідеальної рідини, що належать одній лінії струму:

$$p_{\text{ст}} + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const}, \quad (12)$$

де $p_{\text{ст}}$ – статичний, $\frac{\rho v^2}{2} = p_{\text{д}}$ – динамічний, ρgh – гідростатичний тиск [Па]; ρ – густина рідини [кг/м³]; v – її швидкість [м/с]; h – висота відповідної точки рідини відносно деякого рівня (наприклад, рівня Землі) [м].

Усі рідини характеризуються такими унікальними властивостями, як плинність та в'язкість.

Плинність – це властивість тіл деформуватися з перебігом часу під дією зовнішніх впливів (силових, теплових тощо).

Характеризується величинами, зворотними до величин, що характеризують в'язкість:

$$\phi = 1/\eta \text{ [1/Па}\cdot\text{с]}, \quad (13)$$

де η – динамічний коефіцієнт в'язкості (несистемною одиницею вимірювання є Пуаз (П), що пов'язана з Па·с наступним виразом: 1 Па·с = 10 Пуаз).

В різних тілах існують різні механізми плинності, що визначають опір тіл пластичній або в'язкій течії.

У в'язких тіл (газів, рідин) плинність проявляється вже при мінімальних напруженнях, в пластичних твердих тіл – лише при великих напруженнях, що перевищують границю плинності.

В'язкість або *внутрішнє тертя* – властивість рідких речовин чинити опір переміщенню однієї її частини відносно іншої.

В'язкість рідин – це результат взаємодії внутрішньомолекулярних силових полів, що перешкоджають відносному рухові двох шарів рідини.

Отже, для переміщення шару один відносно одного треба подолати їх взаємне притягання, причому чим воно більше, тим більша потрібна сила зсуву.

При відносному зсуві шарів у газовому середовищі, в результаті перенесення молекулами газу кількості руху під час їх переходу з шару в шар, виникає дотична сила між шарами, що протидіє проковзуванню останніх.

Таким чином, внутрішнє тертя в рідині, на відміну від газів, зумовлене не обміном молекул, а їх взаємним притяганням.

В'язкість рідини залежить від виду рідини, а також від її температури й градієнта швидкості.

Доказом цього є те, що зі збільшенням температури, як відомо, обмін молекул зростає і тертя в газах зростає, а в рідинах спадає у зв'язку із послабленням міжмолекулярного притягання.

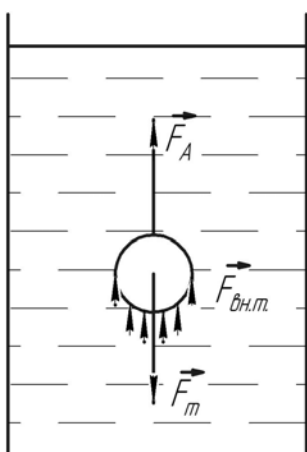


Рис.1. Схема дії сил на тверду кульку, що опускається в рідині

На частинку, яка вільно переміщується в рідкому середовищі діють три сили: сила тяжіння (зумовлює масивні тіла опускатися до дна), сила Архімеда (сила виштовхування стороннього тіла, яке занурюється у рідину) та сила внутрішнього тертя (сила, що чинить опір просуванню твердих тіл рідиною).

Схематичне позначення дії цих сил на об'єкт, який опускається в посудині з рідиною наведено на рис.1.

Сила тяжіння:

$$F_{\delta} = mg \text{ [Н]}; \quad (14)$$

де m – маса тіла, що опускається у рідині [кг]; g – прискорення вільного падіння; приймаємо $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Сила Архімеда:

$$F_A = \rho g V \text{ [Н]}, \quad (15)$$

де ρ – густина рідини [кг/м³]; V – об'єм витісненої тілом рідини [м³].

Сила внутрішнього тертя, що діє між шарами рідини площею S , (рівняння Ньютона):

$$F_{\delta\delta} = \eta \frac{dv}{dx} S \text{ [Н]}, \quad (16)$$

де η – динамічний коефіцієнт в'язкості [1 П (Пуаз) = 0,1 Па·с]; $\frac{dv}{dx}$ – градієнт швидкості.

Сила внутрішнього тертя, що діє на тіло (кульку), що рухається в рідині, радіусом r (закон Стокса):

$$F_{\delta\delta} = 6\pi\eta r v \text{ [Н]}, \quad (17)$$

де v – швидкість кульки [м/с].

Швидкість рівномірного падіння кульки у в'язкій рідині може бути знайдена із закону Пуазейля в якому встановлює зв'язок між середньою швидкістю протікання рідини (або витратою) через капіляр та її в'язкістю у залежності від перепаду тиску.

Так, об'єм рідини, що переноситься за 1 с:

- через переріз циліндричної труби радіусом R (формула Пуазейля):

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} \text{ [м}^3\text{]}; \quad (18)$$

- через змінний переріз:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{dp}{dl} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (18')$$

де l – довжина ділянки труби [м], на кінцях якої підтримується різниця тиску ($p_1 - p_2$) [Па].

Для визначення швидкості, розглядається усталений рух нестисливої рідини з постійною в'язкістю в тонкій циліндричній трубці круглого перерізу під дією постійного перепаду тиску.

Для круглого перерізу розподіл швидкості в залежності від відстані від осі посудини по радіусу кульки визначається рівнянням:

$$v(r) = \frac{(p_1 - p_2) \cdot (R^2 - r^2)}{4\eta L} \text{ [м/с];}$$

із якого можна виразити швидкість рівномірного падіння кульки у в'язкій рідині:

$$v = \frac{2(\rho - \rho_{\text{р}})r^2 g}{9\eta} \text{ [м/с]}, \quad (19)$$

де ρ, ρ_p – густина матеріалу, з якого зроблена кулька і рідини відповідно [кг/м³]; r – радіус кульки [м]; η – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини [Па·с]; $v(r)$ – зміна швидкості рідини по радіусу кульки; R – радіус циліндричної посудини в якій рухається кулька (за умови, що вона рухається по центральній осі посудини) [м]; $p_1 - p_2$ – різниця тисків на вході і на виході з посудини [Па]; L – довжина центральної осі посудини [м].

Часто, при русі тіла в рідині виникають надлишкові сили тертя, які спричиняють втрати напору (тиску) або опір руху тіла з боку оточуючої його рідини і які називаються гідралічний опір (гідродинамічний опір):

$$X = \frac{8\eta l}{\pi R^4}, \text{ [Па·с/м}^3\text{]} \quad (20)$$

де η – динамічний коефіцієнт в'язкості [Па·с]; l, R - відповідно, довжина та радіус каналу [м].

Гідралічний опір оцінюється величиною втраченого напору h_v , що виражає собою ту частину питомої енергії потоку, яка незворотно витрачається на роботу сил опору. Втрата напору, віднесена до довжини каналу, на якому вона відбулася носить назву «гідралічний похил».

При обтіканні нерухомого тіла потоком рідини або, навпаки, коли тіло рухається у нерухомому середовищі гідралічний опір розглядається як проекція головного вектора усіх діючих на тіло сил на напрям руху.

Втрати енергії (зменшення гідравлічного напору) у каналах можна спостерігати в рідині, що рухається не тільки на довгих ділянках, але й на коротких.

В одних випадках втрати напору розподіляються (іноді рівномірно) по довжині каналу – це лінійні втрати; в інших – вони зосереджені на дуже коротких ділянках, довжиною яких можна знехтувати, на так званих місцевих гідравлічних опорах: вентилях, поворотах і заокругленнях, звуженнях, розширеннях, розгалуженнях тощо, тобто скрізь, де потік деформується.

Причиною втрат в обох випадках є в'язкість рідини і втрачена енергія розсіюється у вигляді тепла.

Окрім температури, що має вплив на в'язкість рідин, остання також залежить від ступеня дисоціації (α) – кількісного показника, обчисленого як відношення числа формульних одиниць розчиненої речовини, що розпалися на його йони, до їх загального числа дисоціації.

Ступінь дисоціації залежить від концентрації розчиненої речовини.

Для слабких електролітів, у яких можна знехтувати взаємодією йонів між собою, справедливий закон розведення Освальда:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha} = \frac{K}{n},$$

де n – концентрація молекул, які дисоціюють, K – певний параметр (показник консистенції), який залежить від тиску й температури [Па/с^[N ∈ R]].

При дуже малій концентрації ($n \rightarrow 0$), ступінь дисоціації $\alpha \rightarrow 1$, тобто усі молекули дисоційовані.

У слабких електролітах ступінь дисоціації менший ніж 3%, у електролітах середньої сили – $3\% < \alpha < 30\%$, у сильних – $\alpha > 30\%$.

Залежність в'язкості від швидкості деформації рухомого середовища (степеневий закон Освальда):

$$\tau = K \cdot \gamma^N, \quad (21)$$

де τ – напруження зсуву [Па]; K – показник консистенції; γ – градієнт швидкості зсуву [с⁻¹]; N – показник нелінійності.

Існує два основних режими протікання рідин: ламінарний та турбулентний, рис.2.

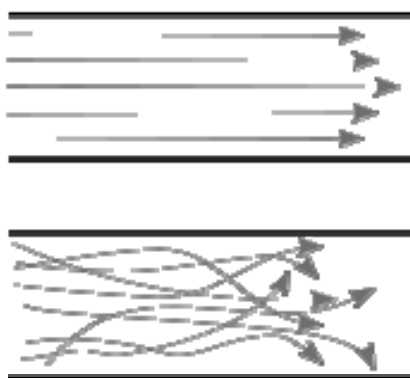


Рис.2. Схематичне зображення ламінарної (вгорі) та турбулентної (внизу) течії в плоскому шарі

Ламінарний режим – ламінарний рух рідини, за якого окремі струмені течуть паралельно, обтікаючи перешкоди рівномірними шарами.

Ламінарна течія спостерігається в дуже в'язких рідинах або за малої швидкості, а також при повільному обтіканні дуже в'язкою рідиною тіл малих розмірів.

Зі збільшенням швидкості руху рідини (газу) ламінарна течія переходить у турбулентну.

Турбулентним називається рух рідини, що супроводжується утворенням вихорів.

Критерієм турбулентності є досягнення числом Рейнольдса критичного значення:

$$Re = \frac{\rho_r v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu}, \quad (22)$$

де v – швидкість рідини [м/с]; $\nu = \frac{\eta}{\rho_r}$ – кінематична в'язкість [Дж·с/кг];

D – діаметр посудини в якій рухається рідина [м].

При малих значеннях числа Рейнольдса добуток характерної для течії швидкості плинучості на характерні розміри перешкод малий в порівнянні із в'язкістю. Тому завдяки в'язкості течія зберігає впорядковану структуру.

При великих значеннях числа Рейнольдса рух рідини стає турбулентним.

Турбулентна течія має місце, коли число Re більше від критичного значення.

Для випадку течії води в круглій трубі $Re_{кр} = 2300$.

Це критичне значення числа Рейнольдса досить умовне і є результатом певного усереднення багаточисельних дослідів.

В кожному конкретному випадку критичне значення числа Рейнольдса буде залежати від властивостей стінки труби та наявності початкових збурень в рідині на вході в трубу.

Наближення макромоделі рідини за своїми властивостями до моделі твердого тіла зумовлене такою властивістю рідин, як поверхневий натяг – фізичного явища, суть якого полягає у прагненні рідини скоротити площу своєї поверхні при незмінному об'ємі.

Коефіцієнт поверхневого натягу:

$$\sigma = \frac{F}{l} = \frac{A}{S} \text{ [Н/м, Дж/м}^2\text{]}, \quad (23)$$

де F – сила поверхневого натягу [Н], l – довжина межі розділу фаз [м], A – робота [Дж] по зміні площі поверхні на величину S [м²].

Завдяки силам поверхневого натягу краплі рідини приймають максимально близьку до сферичної форми і є причинами виникнення капілярного ефекту (Рис.3).

Поверхневий натяг також є причиною того, що деякі комахи можуть переміщатися по воді.

Поверхневий натяг виникає як у випадку поверхні розділу між рідиною й газом, так і у випадку поверхні розділу двох різних рідин.

Для зменшення сил поверхневого натягу використовуються поверхнево-активні речовини (ПАР, сурфактанти, детергенти) – хімічні речовини, які знижують поверхневий натяг рідини, полегшуючи розтікання, у тому числі знижуючи поверхневий натяг на межі двох рідин.

Це речовини, молекули або йони яких концентруються під дією молекулярних сил (адсорбуються) біля поверхні розділу фаз і знижують поверхневу енергію.

У вужчому значенні поверхнево-активними речовинами здебільшого називають речовини, що знижують поверхневий натяг на межі поділу: рідина

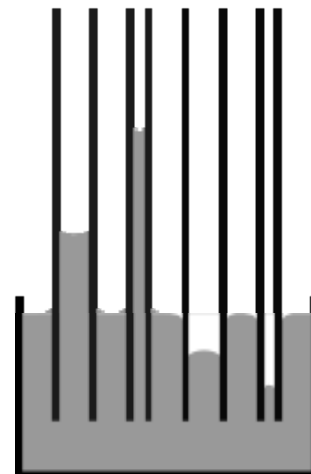


Рис.3. Капілярний ефект у тонких трубках різної товщини й з різним змочуванням

(вода) – повітря (пара), рідина (вода) – рідина (олива), рідина – тверда поверхня. Поверхневий натяг призводить до появи додаткового тиску під викривленою поверхнею рідини.

Цей тиск визначається рівнянням Юнга-Лапласа:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), [\text{Па}] \quad (24)$$

де R_1, R_2 – два локальні радіуси кривизни поверхні [м], σ - коефіцієнт поверхневого натягу [Дж/м²].

Виходячи із вищенаведеного рівняння, можна визначити додатковий тиск під сферичною поверхнею рідини:

$$\Delta p = 2\sigma / r [\text{Па}], \quad (24')$$

де σ – поверхневий натяг рідини [Н/м, Дж/м²];
 r - радіус сферичної поверхні [м].

Капілярний ефект – явище підвищення або зниження рівня рідини у капілярах в порівнянні з тим значенням, яке вимагає закон сполучених посудин. Капілярний ефект виникає через зниження або збільшення тиску рідини під меніском, який утворюється при змочуванні рідиною стінок капіляра.

Висота підняття (опускання) рідини в капілярі (формула Журена, 1717 рік) h залежить від діаметра капіляра d , а також від кута змочування рідиною стінок θ :

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g d} [\text{м}], \quad (25)$$

де θ - крайовий кут змочування [рад], ρ - густина рідини [кг/м³]; d – діаметр капіляра [м].

Механічні коливання та хвилі. Звук

Механічні коливання — це фізичний процес у механіці, під час якого чергуються інтервали збільшення і зменшення фізичної величини.

Розрізняють прості та складні коливання.

Складні коливання – це певним чином скомбіновані прості коливання. Вони найчастіше спостерігаються в живих організмах.

Прості коливання в свою чергу поділяються на:

а) гармонічні коливання – такі коливання, які відбуваються за законом синуса або косинуса;

б) реальні (згасаючі) коливання – ті коливання, що мають місце в природі і поступово згасають;

в) вимушені коливання – відбуваються при дії на систему зовнішньої сили, яка повинна діяти ритмічно (за законом гармонічних коливань).

Гармонійні коливання характеризуються амплітудою, енергією, частотою та/або періодом коливань матеріальної точки.

Основні розрахункові формули для цих характеристик наведені нижче.

Енергія матеріальної точки, що коливається:

- кінетична:

$$E_k = \frac{kA^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ [Дж];} \quad (26')$$

- потенціальна:

$$E_{\dot{r}} = \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ [Дж];} \quad (26'')$$

- повна:

$$E = E_{\dot{e}} + E_{\dot{r}} = \frac{kA^2}{2} \text{ [Дж],} \quad (26''')$$

де k – коефіцієнт пружності (жорсткості) коливної системи [Н/м]; A – амплітуда коливань – максимальне відхилення коливної точки від положення рівноваги

[м]; $\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ – циклічна частота коливань [рад/с]; φ_0 – початкова фаза

коливань [рад] – кут початкового відхилення коливної системи від положення рівноваги (для функції $\sin(x)$) або від максимального відхилення системи (для функції $\cos(x)$); ν – частота коливань [Гц; 1/с] – кількість повних коливань здійснених коливною системою за одиницю часу; T – період коливань [с] – час одного повного коливання.

Згасаючим коливанням притаманні такі характеристики, як коефіцієнт загасання та логарифмічний декремент загасання.

При цьому:

- амплітуда загасаючих коливань:

$$A = A_0 e^{-\beta t} \text{ [м];} \quad (27)$$

- логарифмічний декремент загасання:

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{T}{\tau}, \quad (28)$$

де $A(t)$ та $A(t+T)$ – дві послідовні амплітуди коливань, розділені інтервалом часу, що дорівнює періоду T ; $\beta = \tau^{-1}$ – визначає швидкість зменшення амплітуди з часом [с^{-1}], де τ - це час, протягом якого амплітуда зменшується в e разів [с], (e – основа натурального логарифму).

Зв'язок коефіцієнта і логарифмічного декременту загасання:

$$\lambda = \beta T. \quad (29)$$

Резонанс – це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при наближенні частоти сили, яка викликає ці коливання до частоти, яка дорівнює або близька власній частоті коливальної системи.

Амплітуда вимушених коливань при резонансі:

$$A_{\text{двс}} = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = Q \cdot A_0 \text{ [м];} \quad (30)$$

Кругова частота вимушених коливань при резонансі:

$$\omega_{\text{двс}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \text{ [рад/с],} \quad (31)$$

де ω_0 – власна циклічна частота коливної системи, при якій загасання не відбувається [рад/с]; f_0 – стала загасання або ширина лінії – кількісна характеристика розмитості лінії в спектрі; Q – добротність коливальної системи це величина, що характеризує резонансні властивості коливальної системи, A_0 – статичне відхилення амплітуди коливань [м].

Маятник – тіло, свобода руху якого в полі тяжіння обмежена підвісом в одній точці. Маятник може здійснювати, як коливні, так і обертові рухи.

Маятник характеризується періодом коливань і амплітудою – найбільшим кутом відхилення маятника від положення рівноваги.

У техніці найбільш широко застосовують (рис.4) такі маятники:

- пружинні;
- математичні;
- фізичні;
- крутильні.

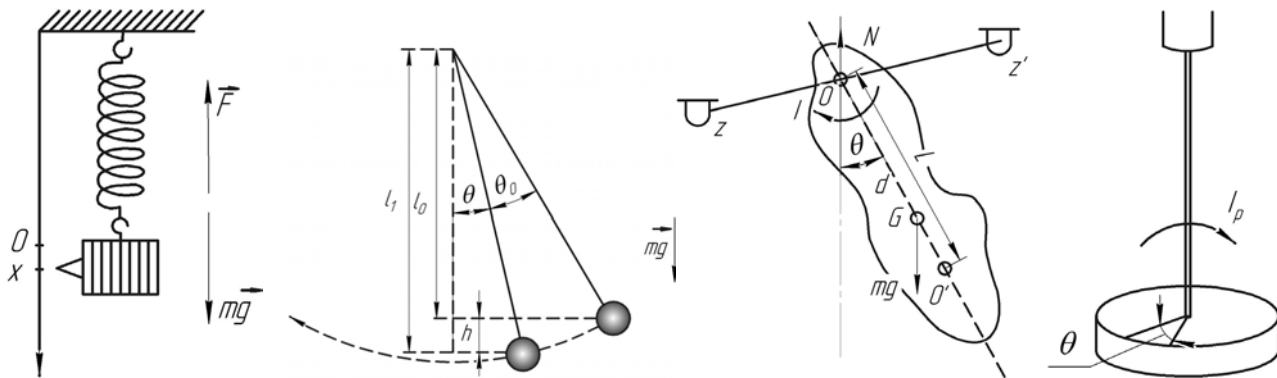


Рис.4. Розрахункові схеми маятників (зліва - направо): пружинний, математичний, фізичний, крутильний

Періоди коливань маятників:

- пружинного маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \text{ [с]}, \quad (32')$$

де k – жорсткість пружини [Н/м]; m – маса вантажу на пружині [кг].

- математичного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \text{ [с]}, \quad (32'')$$

де l – довжина маятника (нитки) [м]; g – прискорення вільного падіння [м/с²].

- фізичного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}} \text{ [с]}, \quad (32''')$$

де I – момент інерції [кг·м²], m – маса тіла маятника, d – відстань від центра маси тіла до осі коливання [м]; g – прискорення вільного падіння [м/с²].

- крутильного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_p}{k}} \text{ [с]}, \quad (32''''')$$

де I_p – полярний момент інерції [кг·м²], k – жорсткість при крученні [Н·м²/рад].

Механічна хвиля – це коливальний рух частинок будь-якого фізичного середовища (газу, рідини чи твердого тіла), що поширюється у вигляді хвиль.

Хвильовий процес – процес передачі коливань.

При цьому частинки середовища не рухаються разом з хвилею, а коливаються навколо своїх положень рівноваги.

Залежно від характеру руху частинок середовища при поширенні розрізняють наступні типи хвиль: поздовжні, поперечні, а також хвилі на поверхні води та на поверхні пружного тіла.

Хвилі характеризуються величиною збурення: інтенсивністю, амплітудою й напрямком поширення.

Швидкість поширення хвилі визначається властивостями середовища і не пов'язана зі швидкістю руху частинок середовища при передачі збурень.

Хвилі одного типу з різними рівнями збурень (різні локальні швидкості руху частинок середовища) поширюються з однаковою швидкістю.

Інтенсивність хвилі або щільність потоку енергії (вектор Умова):

$$I = \frac{\Phi}{S} = \omega \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot A^2 \cdot \omega_0^2 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (33)$$

де ω - об'ємна щільність енергії пружної хвилі [Вт/м²]; v - швидкість розповсюдження хвилі [м/с]; ρ - густина середовища, в якому розповсюджується хвиля [кг/м³]; A – амплітуда коливання [м]; ω_0 – початкова фаза коливання [рад].

Об'ємна щільність енергії пружної хвилі, що поширюється в речовині:

$$\omega_p = \frac{\rho A^2 \omega_0^2}{2} \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (34)$$

де ρ - густина речовини [кг/м³].

Звук – пружні коливання, що лежать в діапазоні частот від 16 Гц до 20 кГц і сприймаються органами чуттів тварин та людини.

Більшість явищ у природі супроводжуються характерними звуками, які сприймаються та розпізнаються вухом людини і тварин і служать для орієнтування та спілкування.

Специфіка сприйняття коливальних рухів частинок середовища людиною визначається психологічними факторами, в зв'язку з чим всі звуки поділяються на дві категорії: власне звук, як засіб комунікації та сприйняття навколишнього середовища (наприклад, звуки мови, музикальні звуки, спів пташок) та звуки зі специфічним спектральним наповненням, часто небажані та дратуючі, які визначаються як шум.

Розділ науки, що вивчає звуки, називається **акустикою**.

При описі звукових полів використовують такі фізичні характеристики як частота, довжина хвилі, амплітуда, швидкість звуку, тиск та швидкість частинок середовища.

В зв'язку з особливістю руху частинок середовища при поширенні звукових хвиль цю швидкість називають коливальною швидкістю.

Коли мова йде про сприйняття звуків людиною, використовують так звані фізіологічні характеристики звуку: тембр, гучність, висота тону.

Звук нижче діапазону чутності людини називають інфразвуком; вище: до 1 ГГц, – ультразвуком, понад 1 ГГц – гіперзвуком.

Зв'язок інтенсивності звуку і звукового тиску для плоскої хвилі:

$$I = \frac{p^2}{2\rho v} \text{ [Б (Бел)]}, \quad (35)$$

де ρ - густина середовища, в якому поширюється звук [кг/м³]; v - його швидкість [м/с].

Бел (Б) – в загальному випадку одиниця логарифмічної відносної величини (логарифма відношення двох однойменних фізичних величин).

Так, наприклад,

$$L_{\acute{a}} = \lg \frac{I}{I_0}, \quad I = 10^{L_{\acute{a}}} I_0 \text{ [Б]}, \quad (36)$$

де L_B – виражений у Белах рівень інтенсивності I звуку відносно I_0 , прийнятого за початковий рівень шкали або в децибелах (дБ):

$$\lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 2 \lg \frac{p}{p_0}, \quad L_{\grave{a}\acute{a}} = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad I = 10^{L_{\grave{a}\acute{a}}/10} I_0 \quad (37)$$

Шкали гучності (E) та інтенсивності звуку (L) співпадають на частоті 1 кГц:

$$E_B = L_B = \lg(I/I_0) \text{ або у фонах: } E_\phi = L_{\text{дБ}} = 10 \lg(I/I_0). \quad (38)$$

Довжина звукової хвилі:

$$\lambda = v \cdot T \text{ [м]}, \quad (39)$$

де v – швидкість розповсюдження звуку в середовищі [м/с], T – періоду коливань [с].

Явище зміни частоти хвилі, яку реєструє приймач, викликане переміщенням джерела або приймача, носить назву ефекту Доплера.

При цьому частота коливань, що сприймається спостерігачем:

$$v' = \frac{v \pm v_c}{v \mp v_{\grave{a}\grave{a}}} v \text{ [Гц]}, \quad (40)$$

де v_c та $v_{\text{дж}}$ – швидкості спостерігача і джерела пружної хвилі відносно середовища [м/с]; v – швидкість поширення хвилі в цьому середовищі [м/с]; v – частота коливань [Гц].

Верхні знаки відповідають зустрічному руху спостерігача і джерела, нижні – руху в протилежні сторони.

Доплерівське зрушення частоти:

$$v_{\grave{a}} = \frac{2v_0}{v} v \text{ [Гц]}, \quad (41)$$

де v_0 – швидкість тіла, що рухається [м/с]; v – швидкість хвилі (ультразвуку) [м/с].

Формула отримана при припущенні, що $v \gg v_0$.

1.2. Приклади розв'язання типових завдань

Приклад 1. Загальна жорсткість декількох однакових пружин, з'єднаних паралельно, в 16 разів більше жорсткості цих же пружин, з'єднаних послідовно. Чому дорівнює кількість пружин?

Дано: $k_1/k_2 = 16$.

Знайти: n

Розв'язок:

При паралельному з'єднанні декількох однакових пружин їх жорсткість буде $k_1 = k_0 n$ (тобто жорсткості додаються).

При послідовному з'єднанні складаються зворотні величини жорсткостей:

$$1/k_2 = n/k_0 \text{ або } k_2 = k_0/n$$

За умовою задачі: $k_1/k_2 = 16$ або $k_1 = 16 k_2$

Підставивши значення k_2 в останнє рівняння, отримаємо: $k_0 n = 16 k_0/n$

Розв'язавши останнє рівняння, отримаємо $n^2 = 16$.

Остаточно, кількість пружин, $n = 4$.

Приклад 2. Для деякого м'яза при навантаженні $P = 0,3$ Н швидкість скорочення складає $u = 24$ мм/с. Навантаження в ізометричному режимі скорочення дорівнює $P_0 = 1,1$ Н, постійна a дорівнює $0,2$ Н.

Обчислити максимальну швидкість u_{max} скорочення.

Дано: $P = 0,3$ Н; $u = 24$ мм/с = $0,024$ м/с; $P_0 = 1,1$ Н; $a = 0,2$ Н.

Знайти: u_{max}

Розв'язок:

Запишемо рівняння Хілла (7):

$$(P + a)(u + b) = (P_0 + a)b = a(u_{max} + b).$$

З останньої рівності знайдемо u_{max} : $u_{max} = P_0 \cdot \frac{b}{a}$, а з першої – константу b :

$$b = u \cdot \frac{P + a}{P_0 - P}. \text{ Тоді, } u_{max} = \frac{P_0}{a} \cdot \frac{u(P + a)}{P_0 - P}.$$

Підставивши числові дані, отримаємо:

$$v_{max} = \frac{1,1}{0,2} \cdot \frac{0,024 \cdot (0,3 + 0,2)}{1,1 - 0,3} = 0,0825 \text{ м/с} = 82,5 \text{ мм/с.}$$

Приклад 3. Визначити густину частинок пилу кулеподібної форми радіусом $r = 1 \text{ мкм}$, що цілком осіли в кімнаті висотою $h = 3 \text{ м}$ за 3 години.

Дано: $r = 1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$; $h = 3 \text{ м}$; $t = 3 \text{ год.} = 10800 \text{ с}$.

Табличні величини, константи: $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – в'язкість повітря.

Знайти: ρ

Розв'язок:

Зі сторони повітря на частинку пилу діє сила Стокса (17): $F_{\text{ст}} = 6\pi\eta Rv$; а зі сторони частинки діє сила Архімеда (15):

$$F_a = \rho g V, \text{ тобто } \rho g V = 6\pi\eta Rv \Rightarrow \rho = \frac{6\pi\eta v}{gV}.$$

Швидкість осідання пилу знаходимо, як $v = \frac{h}{t} = \frac{3}{160 \cdot 60} = 0,312 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

$$\text{Тоді, } V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 4,188 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3.$$

$$\text{Звідки: } \rho = \frac{6\pi \cdot 18,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6} \cdot 0,312 \cdot 10^{-3}}{9,8 \cdot 4,188 \cdot 10^{-18}} = 2590,94 \text{ кг/м}^3$$

Приклад 4. Яка маса бензолу підніметься в капілярі діаметром $d = 1 \text{ мм}$?

Дано: $d = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$.

Табличні величини, константи: $\sigma = 0,03 \text{ Н/м}$ – коефіцієнт поверхневого натягу бензолу.

Знайти: m

Розв'язок:

За формулою Журена (25), висота підняття рідини в капілярі знаходиться за

$$\text{формулою: } h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g d},$$

де θ - крайовий кут змочування, ρ - густина рідини.

В нашому випадку спостерігається явище повного змочування (оскільки бензол піднімається в капілярі вище за рівень бензолу у відкритій посудині), тобто $\cos\theta = 1$ (при $\theta = 0^\circ$).

Масу бензолу, що піднімається в капілярі знаходимо, як:

$$m = \rho \cdot V,$$

де $V = h \cdot \pi r^2 = \frac{h \cdot \pi d^2}{4}$ - об'єм рідини в капілярі, r , d - відповідно радіус та діаметр капіляру.

$$\text{Тоді, } m = \frac{\rho h \pi d^2}{4}.$$

Підставивши в дану формулу значення h , маємо:

$$m = \frac{\rho \pi d^2}{4} \cdot \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g d} = \frac{\pi \sigma d}{2g} = \frac{\pi \cdot 0,03 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 9,81} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 4,8 \text{ мкг}.$$

Приклад 5. У центрифугі проводиться сепарація ядер клітин печінки, діаметр яких $d = 8$ мкм, густина $\rho_1 = 1,3 \cdot 10^3$ кг/м³. Радіус ротора центрифуги $R = 0,05$ м, частота обертання $\nu = 2$ кГц.

Знайдіть силу F , діючу на ці частки.

Дано: $d = 8$ мкм $= 8 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho_1 = 1300$ кг/м³; $R = 0,05$ м; $\nu = 2$ кГц.

Табличні величини, константи: $\rho_0 = 1000$ Н/м – густина води.

Знайти: F

Розв'язок:

Сила, що діє на об'єм рідини V при центрифугуванні з боку навколишньої рідини:

$$F_0 = m\omega^2 R = \rho_0 V \omega^2 R,$$

де ρ_0 – густина рідини (вода); $V = \frac{\pi d^3}{6}$ - об'єм частки; $\omega = 2\pi\nu$ – кутова швидкість; R – відстань від частки до осі обертання (радіус ротора центрифуги).

З іншого боку, доцентрова сила, необхідна для утримання частки на відстані R від осі обертання, дорівнює:

$$F_1 = m_1 \omega^2 R = \rho_1 V \omega^2 R,$$

де ρ_1 – густина частки.

Оскільки $\rho_1 > \rho_0$, то $F_1 > F_0$, тоді частка рухається від осі обертання під дією сили:

$$F = F_1 - F_0 = \frac{\pi d^3}{6} \cdot (\rho_1 - \rho_0) \cdot 2\pi v^2 R.$$

Підставляючи чисельні дані, маємо:

$$F = \frac{\pi(8 \cdot 10^{-6})^3}{6} \cdot (1300 - 1000) \cdot 2\pi \cdot 2000^2 \cdot 0,05 = 634 \cdot 10^{-9} \text{ Н} = 634 \text{ нН}.$$

Приклад 6. Визначте різницю фаз $\Delta\varphi$ в пульсовій хвилі між двома точками артерії, розташованими на відстані $\Delta x = 20$ см один від одного, вважаючи швидкість пульсової хвилі рівної $v = 10$ м/с, коливання серця – гармонійними з частотою $\nu = 1,2$ Гц.

Дано: $\Delta x = 20$ см = 0,2 м; $v = 10$ м/с; $\nu = 1,2$ Гц.

Знайти: $\Delta\varphi$

Розв'язок:

Фаза хвилі в точці, розташованій на відстані x в момент часу t :

$$\varphi_1 = \omega t - \frac{\omega}{v} \cdot x = 2\pi \nu t - \frac{2\pi \nu}{v} \cdot x.$$

Для точки, розташованої на відстані $(x + \Delta x)$ в той же момент часу,

$$\varphi_2 = 2\pi \nu t - \frac{2\pi \nu}{v} \cdot (x + \Delta x).$$

Тоді різниця фаз складе:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \nu t - \frac{2\pi \nu}{v} \cdot x - 2\pi \nu t + \frac{2\pi \nu}{v} \cdot (x + \Delta x) = \frac{2\pi \nu}{v} \cdot \Delta x.$$

Підставляючи чисельні дані, маємо:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot 1,2}{10} \cdot 0,2 = 0,48\pi.$$

1.3. Задачі для самостійного розв'язання

1.3.1. Фізико-механічні властивості біологічних тканин

1. Яке навантаження витримає гомілкорова кістка (в кг), якщо $s_{np} = 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$? Кістку вважати полою трубкою, для якої внутрішній і зовнішній діаметри відповідно 2 та 3 см.
2. Зразок-куб із біополімеру $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ при випробуванні на стискування зруйнувався при навантаженні 150 кН. Яка межа міцності при стискуванні цього зразка?
3. Який мінімальний діаметр повинен мати сталевий стержень-імплантат завдовжки 0,35 м, якщо максимальне навантаження на нього не перевищуватиме 115 кг? Обчисліть відносну δx та абсолютну Δx деформацію стержня під цим навантаженням (напруження на розрив для цієї марки сталі 150 МПа, а модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$).
4. До двох пружин з однаковою недеформованою довжиною та різною жорсткістю по черзі підвішують вантаж. Деформації пружин, відповідно, x_1 та x_2 . Наскільки опуститься вантаж, якщо його підвішують до цих пружин із загальною точкою підвісу і точкою кріплення вантажу, які з'єднані послідовно? (розгляньте випадок також для паралельного з'єднання)
5. Яку силу має спортсмен-лучник, якщо коефіцієнт жорсткості тятиви 10 кН/м, а тятиву спортсмен розтягнув на 15 см.
6. Довжина великої берцової кістки людини, що лежить – 40 см, площа її поперечного перерізу 700 мм^2 . Визначте зменшення довжини кістки людини коли вона стоїть, якщо її маса 70 кг. Модуль Юнга для кістки $4,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.
7. До кістки прикладене навантаження, що відповідає масі $m = 5 \text{ кг}$. Розрахуйте подовження Δl кістки, якщо її початкова довжина $l_0 = 20 \text{ см}$, діаметр поперечного перерізу $d = 8 \text{ мм}$, модуль пружності $E = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

8. На яку висоту може підстрибнути хлопчик масою 30 кг на батуті жорсткістю 800 Н/м?
9. Зовнішній діаметр ліктьової кістки 15 мм, межа міцності кістки 10^8 Па. Яку силу потрібно прикласти при осьовому навантаженні до кістки, щоб стався її розрив. Товщина стінки кістки 3 мм.
10. Є залізний стержень діаметром поперечного перерізу $d = 5$ мм. Яку силу F треба до нього прикласти, щоб викликати таке ж подовження, як і при нагріванні на $\Delta t = 50^\circ\text{C}$? Температурний коефіцієнт лінійного розширення заліза $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, модуль Юнга $E = 196$ ГПа.

1.3.2. Механіка опорно-рухового апарату людини

11. М'яз руки людини може утримати нерухомо найбільший вантаж, що дорівнює 50 кг, а максимальна швидкість скорочення м'яза дорівнює 20 м/с. Чому дорівнює максимальна потужність м'яза, якщо стала рівняння Хілла $a = 200$ Н?
12. Максимальна потужність м'яза відповідає силі 175 Н. Потужність дорівнює нулю, коли $P = 500$ Н. Чому дорівнює максимальна потужність м'яза, якщо при $P = 100$ Н потужність м'яза дорівнює 1073 Вт? Чому дорівнює максимальна швидкість скорочення м'яза?
13. Якою була б температура t_1 м'яза, якби вона працювала як теплова машина з ККД $\eta = 40\%$ при температурі довкілля $t_2 = 20^\circ\text{C}$?
14. У ізотонічному режимі м'яз піднімає вантаж масою $m = 100$ г на висоту $h = 20$ см. Обчисліть теплопродукцію Q м'яза, якщо його ККД $\eta = 40\%$.
15. Який максимальний вантаж може підняти м'яз на висоту $h = 1$ м за рахунок енергії $Q = 1$ кДж? ККД м'яза $\eta = 30\%$.
16. Максимальна загальна потужність, що розвивається м'язом, складає $N_{\text{заг.max}} = 10$ Вт, а навантаження в ізометричному режимі скорочення $P_0 = 300$ Н. Обчисліть загальну потужність $N_{\text{заг}}$ м'яза при навантаженні в $P = 180$ Н.

17. При скороченні м'яза за час $t = 0,3$ с виділилося $Q = 5,5$ кДж теплоти. Обчисліть корисну потужність $N_{кор}$, що розвивається м'язом, якщо його ККД $\eta = 45$ %.
18. У експериментах на кравецькому м'язі жаби було визначено, що навантаження в ізометричному режимі скорочення дорівнювало $P_0 = 0,65$ Н, максимальна швидкість скорочення $u_{max} = 50$ мм/с, а при навантаженні $P = 0,3$ Н швидкість скорочення склала $u = 10$ мм/с. Обчисліть значення констант a і b для цього м'яза.
19. М'яз, скорочуючись із швидкістю $u = 6$ мм/с, розвиває загальну потужність $N_{заг} = 2,7$ мВт. Навантаження в ізометричному режимі скорочення для цього м'яза складає $P_0 = 0,8$ Н, константа b дорівнює 23 мм/с. Обчисліть роботу A вироблену м'язом за $t = 0,5$ с.
20. Знайти навантаження в ізометричному режимі скорочення м'яза зі швидкістю $u = 3,5$ мм/с. М'яз розвиває загальну потужність $N_{заг} = 3,5$ мВт. Робота вироблена м'язом за $t = 1$ с дорівнює $1,2$ Дж. Константа $b = 17$ мм/с.

1.3.3. В'язкий плин в медико-біологічних системах. Капілярні явища в біофізиці

21. Алюмінієва кулька радіусом $r = 3$ мм падає в стовпчик гліцерину, температура якого $t = 20$ °С. Яка встановиться швидкість кульки?
22. Яка встановиться швидкість повітряної бульбашки (діаметр $d = 1$ мм), що піднімається у воді, температура якої $t = 20$ °С (густиною повітря у бульбашці знехтувати).
23. Визначити швидкість осідання еритроцитів у плазмі крові, вважаючи їх ізольованими кульками діаметром $d = 1$ мкм (густина еритроцитів $\rho_{ер} = 1090$ кг/м³). Густина плазми крові $\rho_{пл} = 1030$ кг/м³.
24. Знайти швидкість і час повного осідання сферичних частинок крові радіусом $r = 2$ мкм (густина частинок $\rho_ч = 2,5$ г/см³) у шарі товщиною $l = 3$ см: а) при дії сили тяжіння; б) при центрифугуванні з $\nu = 500$ с⁻¹ (у цьому випадку силою тяжіння знехтувати). Радіус центрифуги $R = 10$ см.

25. Визначити час підйому частинок олії діаметром $d = 2$ м при відстоюванні молока в склянці висотою $h = 10$ см. Густина молока $\rho_m = 1034$ кг/м³, густина олії $\rho_{ол} = 940$ кг/м³, в'язкість молока $\eta = 1800$ мкПа·с.
26. Визначити масу води, що піднялася в капілярі стебла рослини під дією капілярних сил. Діаметр капіляра $d = 0,4$ мм. Змочування вважати повним.
27. У посудину з ртуттю опущений відкритий капіляр, внутрішній діаметр якого $d = 3$ мм. Різниця рівнів у посудині і капілярі $\Delta h = 3,7$ мм. Знайти радіус кривизни R меніска в капілярі.
28. Етиловий спирт краплями витікає із посудини через вертикальну трубку діаметром $d = 2$ мм. Краплі відриваються через час $\Delta t = 1$ с одна за одною. За який час витече 10 г спирту? Діаметр шийки краплі у момент відриву вважати рівним внутрішньому діаметру трубки.
29. Сто крапель рідини, що витікають із трубки діаметром $d = 2$ мм, мають масу $m = 5,1$ г. Визначити поверхневий натяг цієї рідини.
30. Який діаметр має перетяжка краплі дистильованої води масою $m = 50$ мг при відриві її від піпетки?

1.3.4. Коливально-обертальний рух біологічних об'єктів.

Біофізика звукових коливань

31. Фігурист обертається з частотою $\nu_1 = 15$ Гц. Як зміниться момент інерції фігуриста, якщо він випростає руки в сторони і частота обертання при цьому стане $\nu_2 = 5$ Гц?
32. В центрифугі, радіус якої $r = 10$ см, на ядра клітин печінки при частоті 2 кГц діє сила $F = 1,2$ мкН. Знайти масу ядер та оцінити їхній діаметр. Вважати, що ядра мають сферичну форму та густину $\rho = 1300$ кг/м³.
33. З якою частотою повинна обертатися центрифуга для створення п'ятикратних перевантажень, якщо радіус центрифуги 8 м? Знайти силу, яка діятиме на льотчика масою 75 кг в такій центрифугі.
34. Які перевантаження виникають в центрифугі, що обертається навколо вертикальної осі з частотою $\nu = 0,6$ Гц? Радіус центрифуги $R=2$ м.

35. Два звуки, частотою $\nu = 1$ кГц, відрізняються за гучністю на 50 фон.
У скільки разів відрізняються їхні інтенсивності?
36. Джерело звуку робить коливання за законом $x = \sin 2000\pi t$. Швидкість поширення звуку $v = 340$ м/с. Запишіть рівняння коливання для точки, що знаходиться на відстані $y = 102$ м від джерела.
37. Розмова людини оцінюється рівнем гучності $E = 50$ фон ($\nu = 1$ кГц). Яким буде рівень гучності, якщо одночасно говоритимуть 20 осіб?
38. Визначити силу, яка діє на барабанну перетинку при гучності 80 фон, якщо частота $\nu = 1$ кГц, а площа перетинки $S = 60$ мм²?
39. Логарифмічний декремент затухання $\delta = 0,004$. За який час амплітуда зменшиться у 50 разів, якщо $\nu = 100$ Гц?
40. За 10 с амплітуда згасаючих коливань зменшилася втричі. За який час вона зменшиться у 12 разів?

1.4. Контрольні питання

1. Що називається деформацією?
2. Сформулюйте закон Гука.
3. Які деформації називаються пружними? Для яких деформацій справедливий закон Гука?
4. В чому полягає фізичний зміст модуля Юнга? Записати формулу за допомогою якої можна визначити модуль Юнга.
5. Чи залежить модуль Юнга від геометричних розмірів досліджуваного зразка?
6. Наведіть визначення поняття «скорочувальний елемент». Яким чином його використовують для моделювання м'язової діяльності?
7. Сформулюйте закон Ньютона для руху в'язких рідин.
8. Що називають в'язкістю рідини? Дати означення коефіцієнта в'язкості і його одиниці вимірювання, виходячи з формули Ньютона для сили внутрішнього тертя.
9. Записати рівняння Кессона для в'язкості неньютонівських рідин. Пояснити фізичний зміст величин, які до нього входять.

10. Як і чому змінюється коефіцієнт в'язкості рідини при зміні температури?
11. Записати формулу Гагена-Пуазейля, пояснити її фізичний зміст.
12. Вивести розрахункову формулу для визначення коефіцієнта в'язкості методом Оствальда.
13. В чому полягає порівняльний метод вимірювання коефіцієнта в'язкості за допомогою віскозиметра Оствальда?
14. Ньютонівські і неньютонівські рідини. Від чого і як залежить їх в'язкість?
15. Сформулюйте рівняння нерозривності струменя рідини.
16. Сформулюйте рівняння Бернуллі.
17. Поняття про поверхневий натяг рідини на основі молекулярно-кінетичної теорії. Як направлені сили поверхневого натягу? Вказати точку прикладання сили поверхневого натягу.
18. Чим характерна природа явища поверхневого натягнення? Основні визначення та закони поверхневого натягнення.
19. Дати визначення (енергетичне і силове) коефіцієнта поверхневого натягу, його одиниць вимірювання.
20. Які речовини називаються поверхнево-активними? Який механізм їх впливу на поверхневий натяг рідини?
21. Покладіть на поверхню води сірник і торкніться води шматочком мила по одну сторону поблизу сірника. Поясніть спостережуване явище.
22. Капілярні явища. Газова емболія.
23. Куди переміщатиметься вода в горизонтальному капілярі при його нагріві з одного боку? Чому?
24. Формула Лапласа, пояснити її фізичний зміст.
25. Як визначається період коливань пружинного та математичного маятника?
26. Дайте визначення логарифмічному декременту загасання.
27. Чому при ультразвукових дослідженнях і ультразвуковій терапії необхідно уникати повітряного прошарку між випромінювачем ультразвуку і опромінюваними ділянками тіла?
28. Сформулюйте ефект Доплера в акустиці.

2. ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

В розділі «Термодинаміка біологічних процесів та систем» розглядаються практичні завдання на основі законів та процесів, що відбуваються в рівноважних та нерівноважних термодинамічних біосистемах, а саме: основні рівняння термодинаміки, закони Гесса, вільних енергій Гібса та Гельмгольца, хімічного та електрохімічного потенціалів, тощо [12, 22].

Особлива увага в даному розділі приділяється задачам, в яких розглядається процес окислення спожитих речовин в організмах людини та тварин, що відбувається зі споживанням цими організмами кисню та вуглекислого газу [11, 23].

2.1. Основні теоретичні відомості

Термодинаміка біологічних систем

Термодинаміка біологічних систем – розділ біофізики, що вивчає закони поширення, передачі та збереження тепла між біологічними об'єктами та зовнішнім середовищем.

Термодинаміка вивчає процеси, які відбуваються в тілах, що перебувають у тепловій рівновазі з іншими тілами. Важливою характеристикою теплової рівноваги є *температура* – фізична величина, яка описує здатність макроскопічної системи (тіла) до самовільної передачі тепла іншим тілам.

На мікроскопічному рівні температура пов'язана із тепловим рухом атомів та молекул, із яких складаються фізичні тіла, а саме – з їх кінетичною енергією.

Тобто, температура – скалярна фізична величина, яка характеризує середню кінетичну енергію частинок макроскопічної системи, що припадає на один ступінь їх вільності.

Зміни термодинамічного стану фізичних систем вивчаються при розгляді термодинамічних процесів.

Основним законом термодинаміки є так званий перший закон термодинаміки – термодинамічне формулювання закону збереження енергії.

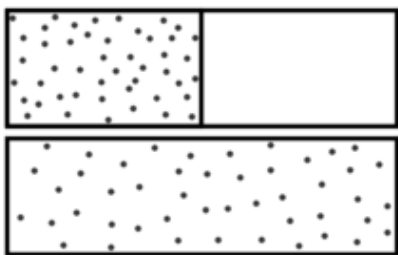
Перший закон термодинаміки:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (42)$$

де δQ – теплота [Дж], dU – зміна внутрішньої енергії [Дж], δA – робота системи над зовнішніми тілами [Дж].

Другий закон термодинаміки встановлює неможливість повного перетворення теплоти в механічну роботу.

Основною термодинамічною величиною, що використовується в другому законі термодинаміки є *ентропія* S [Дж/моль·К] – міра розсіювання тепла, рис.5 (після зняття перегородки газ розповсюджується у всьому об'ємі, переходить із



впорядкованого стану (всі частинки ліворуч) до безпорядку (ентропія зростає).

Внаслідок ентропії, частина енергії термодинамічної системи, не може бути використана для виконання роботи, оскільки пов'язана з незворотними процесами розсіювання.

Рис.5. Ілюстрація самочинного нерівноважного процесу в ізольованій системі.

Вона також є мірою безладу в термодинамічній системі.

Ентропія є екстенсивною величиною (залежить від маси і об'єму системи), тому сумарна ентропія двох систем:

$$S = S_1 + S_2.$$

Ентропія є функцією стану системи, її зміна не залежить від способу переходу з кінцевого стану у початковий: $\Delta S = S_2 - S_1$, якщо обидва стани рівноважні.

Стаціонарний стан відкритої системи:

$$dS = dS_i + dS_e = 0, \quad (43)$$

де dS - повна зміна ентропії, dS_i - зміна ентропії за рахунок процесів всередині системи, dS_e - зміна ентропії за рахунок взаємодії системи з оточенням.

У самочинних процесах, які протікають в ізольованій системі, ентропія зростає ($\Delta S > 0$).

Ця властивість є основою другого закону термодинаміки:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}, \quad (44)$$

де dS – зміна ентропії, знак « \geq » має місце для зворотних процесів, знак « $>$ » - для незворотних процесів.

Ентропія залишається сталою при рівноважних зворотних процесах в ізольованій системі, тобто системі, що не обмінюється ні енергією, ні частинками з іншими системами.

У неізольованих термодинамічних системах зміна ентропії підпорядкована першому закону термодинаміки.

Процеси, що відбуваються зі сталою ентропією називаються *ізоентропійними*.

Серед рівноважних процесів до таких належить адіабатичний процес. Ізоентропійними також можуть бути деякі нерівноважні процеси.

Ентропія аналогічна теплоємності речовини, яка (за умови, що вона має властивості ідеального газу) прямо пропорційно залежить від кількості молекул в ній, тоді як така залежність температури обернено пропорційна, оскільки теплова енергія розподіляється між молекулами (розсіювання тепла).

Така ж залежність від кількості молекул і в ентропії, за умови сталої кількості теплоти.

Зв'язок між теплоємністю та ентропією задається формулою:

$$C_V = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V. \quad (45)$$

Зв'язок між ентропією системи та кількістю можливих «мікростанів» (мікроскопічних станів), якими може реалізуватися макроскопічний стан із заданими властивостями описується у принципі Больцмана (Людвіг Больцман, 1877 рік).

Розглянемо, наприклад, ідеальний газ у посудині.

Мікростан визначений як положення та імпульси кожного атома, з яких складається система.

Братимемо до уваги тільки ті мікростани, для яких розташування всіх частинок не виходить за межі посудини, а загальна енергія газу, що визначається як сума кінетичних енергій атомів, дорівнює певній величині.

Принцип Больцмана:

$$S = k \ln W \text{ [Дж/моль·К]}, \quad (46)$$

де W – термодинамічна ймовірність стану системи.

Термодинамічні потенціали – це набір функцій стану термодинамічної системи, який характеризує її поведінку при термодинамічних процесах.

У випадку внутрішньої енергії і вільної енергії, їхня зміна у самочинних процесах дорівнює виконаній системою роботі.

До термодинамічних потенціалів належать:

- внутрішня енергія U (повна енергія термодинамічної системи, яка складається з кінетичної енергії хаотичного руху молекул, потенціальної енергії взаємодії між ними і внутрішньомолекулярної енергії):

$$dU = Tds - pdV - \mu dN \text{ [Дж]}, \quad (47)$$

де μ – хімічний потенціал [Дж/моль], N – кількість часток [моль].

- ентальпія H (теплова функція, що характеризує стан термодинамічної системи при виборі як основних незалежних змінних ентропії (S) і тиску (p)).):

$$\begin{aligned} H &= U + pV \\ dH &= TdS + Vdp + \mu dN \end{aligned} \text{ [Дж];} \quad (48)$$

Ентальпія використовується для опису ізобарних процесів, тобто процесів, які відбуваються при сталому тиску.

Якщо процес проходить при сталому тиску, то приріст ентальпії дорівнює переданій тілу теплоті $dQ = TdS$.

- вільна енергія Гіббса G (повна хімічна енергія системи (кристала, рідини тощо):

$$\begin{aligned} G &= H - TS = U + pV - TS \\ dG &= -SdT + Vdp + \mu dN \end{aligned} \text{ [Дж];} \quad (49)$$

- вільна енергія Гельмгольца F (термодинамічний потенціал, який визначає рівноважні термодинамічні характеристики системи в залежності від об'єму та температури; та частка енергії газу, яку можна було відібрати й перетворити в корисну роботу):

$$\begin{aligned} F &= U - TS = H - pV - TS \\ dF &= -SdT - pdV + \mu dN \quad [\text{Дж}]. \end{aligned} \quad (50)$$

З чотирьох основних фізичних величин, які характеризують термодинамічну систему: тиску, об'єму, температури й ентропії, термодинамічні потенціали залежать тільки від двох.

Два інші визначаються, як похідні від термодинамічних потенціалів.

Наприклад, знаючи вільну енергію, яка є функцією об'єму й температури, можна знайти тиск, встановивши, таким чином, рівняння стану.

Таким чином, зміна ентропії при нагріванні або охолодженні речовини від температури T_1 до температури T_2 :

$$\Delta S = nC_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [\text{Дж/моль} \cdot \text{К}], \quad (51)$$

де C_p – молярна теплоємність речовини при постійному тиску [Дж/моль·К].

У лінійній нерівноважній термодинаміці особливе значення має співвідношення взаємності Онзагера симетрії кінетичних коефіцієнтів:

$$L_{ik} = L_{ki}, \quad (52)$$

яке вказує на рівність коефіцієнтів взаємозв'язку двох необоротних процесів, коли система має стан, близький до термодинамічної рівноваги.

При цьому основне рівняння лінійної нерівноважної термодинаміки незворотних процесів:

$$\hat{O} = T \frac{dS}{dT} = \sum_{k=1}^n L_{kn} X_k X_n, \quad (53)$$

де Φ – потік термодинамічної величини, X_k – термодинамічні сили, $X_i = \frac{\partial \Delta S}{\partial \alpha_i}$,

де ΔS – відхилення ентропії від свого максимального значення; L_{kn} – кінетичні коефіцієнти.

Закон лінійних співвідношень визначає залежність між термодинамічними силами та змінами (потоками) в термодинамічних системах.

Термодинамічними силами є різні градієнти (концентрації, електричні, температурні тощо).

Закон лінійних співвідношень вказує, що зміна фізичної величини J є лінійною функцією термодинамічної сили X , де L – коефіцієнт пропорційності:

$$J = LX. \quad (54)$$

Так, наприклад, виробництво (швидкість зміни) ентропії може бути виражене формулою:

$$\sigma = \frac{\partial \Delta S}{\partial t} = \sum_i L_i X_i. \quad (55)$$

Лінійний закон узагальнює багато емпіричних принципів, наприклад, закон Фіка (залежність перенесення речовин від концентраційного градієнта), закон Ома (залежність перенесення електричного заряду від градієнта електричного потенціалу) тощо.

Теорема Пригожина: У стаціонарному стані за фіксованих зовнішніх параметрів швидкість продукції ентропії у відкритій системі набуває мінімального значення $dS/dt \rightarrow \min$, або локальна продукція ентропії у відкритій системі набуває мінімального значення $\sigma = \sigma_{\min}$.

Теорема Пригожина пояснює стійкість стаціонарних станів у відкритих системах. Якщо система випадково виходить з цього стану, її ентропія збільшується.

Тоді в системі виникають процеси, які прагнуть повернути її в стаціонарний стан.

Теорема Пригожина про мінімум швидкості продукції ентропії в стаціонарному стані є кількісним критерієм еволюції відкритої системи: відкрита система прямує до стаціонарного стану, в якому розсіювання енергії є мінімальним.

Стаціонарний стан відкритої системи подібний до термодинамічної рівноваги, оскільки обом станам притаманна стійкість параметрів стану, що характеризують їх.

Але стаціонарний стан істотно відрізняється від стану рівноваги, оскільки відбувається обмін енергії з навколишнім середовищем: кількість вільної енергії в системі необхідно підтримувати.

Ентропія системи в стаціонарному стані стабільна, але не максимальна.

Багато фізіологічних параметрів є досить стабільними. Їх стаціонарний рівень регулюють спеціальні фізіологічні механізми.

Паприклад підтримання стаціонарного стану можна навести терморегуляцію організму.

Сталість температури забезпечується підтриманням балансу теплопродукції та тепловіддачі. Як наслідок, температура тіла підтримується незмінною, попри коливання зовнішньої температури.

Термодинамічні системи у багатьох випадках можуть обмінюватися атомами й молекулами із навколишнім середовищем.

Окрім теплової рівноваги приведені в контакт термодинамічні системи намагаються встановити рівновагу за складом.

Процеси встановлення рівноваги за складом повільніші за процеси встановлення рівноваги за температурою. Їхня швидкість залежить від природи речовини.

Прагнення термодинамічних систем до встановлення рівноваги за складом кількісно характеризується величиною, яка називається *хімічним потенціалом*.

Процеси встановлення рівноваги у термодинамічних системах відбуваються таким чином, щоб вирівняти хімічний потенціал у кожній області.

Хімічний потенціал μ (енергія, яку необхідно затратити, щоб додати в систему ще одну частку без здійснення роботи):

$$\mu = \mu_0 + RT \ln C \text{ [Дж/моль]}, \quad (56)$$

де μ_0 – стандартний хімічний потенціал (за умов $P_i = 1$ атм, $C_i = 1$ моль/л) [В], $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – термодинамічна температура [К]; C – молярна концентрація речовини [моль/л].

Електрохімічний потенціал (термодинамічна функція, що характеризує стан якого-небудь компоненту, що складається із заряджених частинок (електронів, йонів), у фазі даного складу. Електрохімічний потенціал може бути визначений як приріст будь-якого з термодинамічних потенціалів системи при введенні в неї однієї зарядженої частинки i -того компоненту при незмінних решти всіх змінних, від яких залежить даний потенціал.

Таким чином, різниця електрохімічних потенціалів між двома точками є енергією, яка буде виділена в системі при переміщенні частинки між ними):

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln C + zF \Delta\varphi, \text{ [Дж/моль]} \quad (57)$$

де μ_0 – хімічний потенціал розчинника (вільна енергія Гіббса в розрахунку на один моль розчинника) [Дж/моль]; z – валентність йонів речовини, що переноситься; $F = 96500$ Дж/моль·В – стала Фарадея, $\Delta\varphi$ – різниця електричних потенціалів на мембрані [В].

Згідно з простою моделлю зіткнень хімічна реакція між двома вихідними речовинами може проходити тільки в результаті зіткнення молекул цих речовин. Але не кожне зіткнення призводить до хімічної реакції.

Необхідно подолати певний енергетичний бар'єр, щоб молекули почали реагувати одна з одною.

Тобто молекули повинні мати певну мінімальну енергію (енергію активації), щоб подолати цей бар'єр.

Залежність константи швидкості хімічної реакції (коефіцієнту дифузії) від температури встановлює активаційний закон дифузії – закон Арреніуса:

$$D = D_0 e^{-E_a / k_B T} \text{ [м}^2\text{/с]}, \quad (58)$$

де D_0 – передекспоненційний множник [м²/с], E_a – енергія активації [Дж], $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — стала Больцмана [Дж/К], T – абсолютна температура [К].

Закон Гесса: тепловий ефект хімічної реакції при постійному об'ємі або тиску (робота з розширення системи відсутня) не залежить від шляху реакції, а лише від початкового й кінцевого станів системи:

$$Q = \Delta H \text{ [Дж]}, \quad (59)$$

де ΔH - різниця ентальпій вихідних речовин та продуктів реакції [Дж].

Закон Гесса справедливий, оскільки ентальпія є функцією стану системи й не залежить від того, яким чином ця система утворилася.

Залежність енергії взаємодії двох нейтральних атомів від віддалі між ними (потенціал Ленард-Джонса) – модельний потенціал, який наближено описує залежність енергії взаємодії двох нейтральних атомів від віддалі між ними (Джон Ленард-Джонс, 1931 рік):

$$U(r) = 4\varepsilon \left(\frac{\sigma^{12}}{r^{12}} - \frac{\sigma^6}{r^6} \right) = \varepsilon \left(\frac{r_0^{12}}{r^{12}} - 2 \frac{r_0^6}{r^6} \right) \text{ [Дж]}, \quad (60)$$

де σ – мінімальна відстань між нерухомими молекулами [м], ε – глибина «потенціальної ями» (енергія зв'язку молекул) [Дж], r – віддаль між атомами [м], r_0 – мінімальна рівноважна віддаль між атомами [м].

На великій відстані нейтральні атоми притягаються завдяки Ван-дер-Ваальсовим силам, які виникають внаслідок взаємної поляризації електронних оболонок і є взаємодією між наведеними дипольними моментами. Для нейтральних атомів, які не мають власного дипольного моменту, це притягання, обернено пропорційне шостому степеню віддалі.

На близьких віддальях нейтральні атоми, які не утворюють між собою хімічних сполук, відштовхуються, завдяки принципу виключення Паулі. Закон цього відштовхування в загальному випадку невідомий і модулюється наближеними формулами.

Потенціал Ленард-Джонса є однією з таких формул. Дванадцятий степінь у законі відштовхування вибраний довільно, для спрощення математичних перетворень.

2.2. Приклади розв'язання типових завдань

Приклад 7. Визначимо ефективність енергетичних витрат людини в стані м'язового спокою, якщо за годину вона видихає 350 л повітря, в якому міститься 15% кисню і 5% вуглекислого газу:

Дано: $\tau = 1 \text{ год} = 60 \text{ хв}$; $V = 350 \text{ л} = 0,35 \text{ м}^3$, $C_{O_2} = 15\%$, $C_{CO_2} = 5\%$.

Табличні величини, константи: $[V_{O_2}]$ – об'єм споживаного кисню при окисленні 1 гр. поживної речовини (для білку 0,97 л/гр.; для жиру 2,0 л/гр.; для вуглеводу 0,83 л/гр); $[V_{CO_2}]$ – об'єм виділеного вуглекислого газу при окисленні 1 гр. поживної речовини (для білку 0,77 л/гр.; для жиру 1,4 л/гр.; для вуглеводу 0,83 л/гр); $Q^0 = 20,566$ кДж/хв, $KK_{\delta} = 20101$ Дж – калориметричний коефіцієнт для білку; δ – дихальні коефіцієнти для поживних речовин (для білку 0,80; для жиру 0,71; для вуглеводу 1,0); Q_0^B – енергетичний еквівалент для поживних речовин (для білку 18,8 кДж/л; для жиру 19,6 кДж/л; для вуглеводу 21,0 кДж/л).

Знайти: η

Розв'язок:

Визначимо скільки кисню та вуглекислого газу виділиться за час τ :

$$V_{O_2} = C_{O_2} \cdot V = 0,15 \cdot 350 = 52,5 \text{ л.}; V_{\tilde{N}O_2} = C_{\tilde{N}O_2} \cdot V = 0,05 \cdot 350 = 17,5 \text{ л.}$$

При цьому окислюється:

$$\text{Білку: } m_A = \frac{V_{O_2}}{[V_{O_2}^a]} + \frac{V_{CO_2}}{[V_{CO_2}^a]} = \frac{52,5}{0,97} + \frac{17,5}{0,77} = 76,85 \text{ гр.}$$

$$\text{Жиру } m_E = \frac{V_{O_2}}{[V_{O_2}^e]} + \frac{V_{CO_2}}{[V_{CO_2}^e]} = \frac{52,5}{2,0} + \frac{17,5}{1,4} = 38,75 \text{ гр.}$$

$$\text{Вуглеводів: } m_A = \frac{V_{O_2}}{[V_{O_2}^a]} + \frac{V_{CO_2}}{[V_{CO_2}^a]} = \frac{52,5}{0,83} + \frac{17,5}{0,83} = 38,75 \text{ гр.}$$

Знайдемо дихальний коефіцієнт:

$$\hat{A}\hat{E} = 1 - \frac{C_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}{C_{O_2} \cdot V_{O_2}} = 1 - \frac{0,05 \cdot 17,5}{0,15 \cdot 52,5} = 0,89.$$

Із Додатків знаходимо, що для дихального коефіцієнта $DK = 0,89$, дихальний еквівалент складе: $\delta = 20,566$ кДж/л.

Загальна кількість витрат:

$$Q' = \delta \cdot V = 20,566 \cdot 350 = 7198,1 \text{ кДж.}$$

Кількість енергетичних витрат, затрачених на окислення поживних речовин:

$$Q = (V_{O_2} - V_{CO_2}) \cdot (\delta_A \cdot Q_0^A + \delta_E \cdot Q_0^E + \delta_A \cdot Q_0^A);$$

$$Q = (52,5 - 17,5) \cdot (0,8 \cdot 18,8 + 0,71 \cdot 19,6 + 1,0 \cdot 21,0) = 1748,46 \text{ кДж.}$$

Таким чином, ефективність енергетичних витрат людини в стані м'язового

$$\text{спокою становить: } \eta = 1 - \frac{Q' - Q}{Q'} \cdot 100\% = \frac{7198,1 - 1748,46}{7198,1} \cdot 100\% = 75,5\% .$$

Приклад 8. При перенесенні етану з бензолу у воду при температурі $t = 25^\circ\text{C}$ ентальпія H зменшилася на 9240 Дж/моль, а ентропія S – на 84 Дж/моль·К. Розрахуйте зміну повного термодинамічного потенціалу ΔG в цьому процесі. Чи буде бензол розчинятися у воді?

Дано: $\Delta H = 9240$ Дж/моль; $T = 25^\circ\text{C} = 298$ К; $\Delta S = 84$ Дж/моль·К.

Знайти: ΔG

Розв'язок:

Зміна повного термодинамічного потенціалу складає: $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$, тобто:

$$\Delta G = -9240 - 298 \cdot (-84) = 15,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль} = 15,8 \text{ кДж/моль}.$$

Оскільки $\Delta G > 0$, то бензол слабо розчинний у воді.

Приклад 9. Визначити мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані йонами натрію при температурі 27°C , якщо концентрація натрію з однієї сторони мембрани дорівнює 10^{-3} моль/л, а з іншої – 10^{-4} моль/л. Зміною хімічного потенціалу нехтувати. Зміна електрохімічного потенціалу 5 мВ.

Дано: $[\text{Na}^+]_o = 10^{-3}$ моль/л, $[\text{Na}^+]_i = 10^{-4}$ моль/л, $\Delta\mu = 0$, $\Delta\tilde{\mu} = 5 \cdot 10^{-3}$ В,
 $T = 27^\circ\text{C} = 300$ К,

Табличні величини, константи: $R = 8,31$ Дж/моль·К – газова стала,

$F = 96500$ Дж/моль·В – стала Фарадея, $z = 1$ – валентність натрію.

Знайти: $\Delta\phi$

Розв'язок:

Зміна електрохімічного потенціалу (57) при транспорті йонів через мембрану із фази А у фазу В визначається як:

$$\Delta\tilde{\mu} = \mu_B^0 - \mu_A^0 + R \cdot T \cdot \ln \frac{C_B}{C_A} + z \cdot F \cdot \Delta\phi,$$

де $\Delta\phi$ – різниця електричних потенціалів на мембрані.

В нашому випадку: $\Delta\tilde{\mu} = R \cdot T \cdot \ln \frac{[Na^+]_o}{[Na^+]_i} + z \cdot F \cdot \Delta\varphi$, звідки:

$$\Delta\varphi = \frac{\left| \Delta\tilde{\mu} - R \cdot T \cdot \ln \frac{[Na^+]_o}{[Na^+]_i} \right|}{z \cdot F} = \frac{\left| 5 \cdot 10^{-3} - 8,31 \cdot 300 \cdot \ln \frac{10^{-3}}{10^{-4}} \right|}{1 \cdot 96500} = 0,06 \text{ В} = 60 \text{ мВ.}$$

Приклад 10. Синтез сахарози здійснюється за наступною схемою: глюкоза + фруктоза + АТФ \rightarrow сахароза + АДФ + Ф, $\Delta G^0 = -6,3$ кДж/моль.

Визначте константу рівноваги цієї реакції.

Дано: $\Delta G^0 = -6300$ Дж/моль; $T = 298$ К.

Табличні величини, константи: $R = 8,31$ Дж/моль·К – газова стала.

Знайти: K

Розв'язок:

Запишемо: $\Delta G^0 = -RT \ln K$, звідки $K = \exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right)$.

Враховуючи, що $\Delta G^0 = -6300$ Дж/моль, а температура в стандартних умовах

$T = 298$ К, обчислимо: $K = \exp\left(-\frac{-6300}{8,31 \cdot 298}\right) = 12,7$.

Приклад 11. При неферментативному розкладанні перекису водню енергія активації реакції складає $E_{акт.н} = 75$ кДж/моль, а при участі ферменту каталази знижується до $E_{акт.ф} = 8$ кДж/моль.

Розрахуйте, в скільки разів збільшиться швидкість ферментативної реакції в порівнянні з неферментативною при температурі $t = 25^\circ\text{C}$.

Дано: $E_{акт.н} = 75$ кДж/моль = $75 \cdot 10^3$ Дж/моль;

$E_{акт.ф} = 8$ кДж/моль = $8 \cdot 10^3$ Дж/моль; $T = 298$ К.

Табличні величини, константи: $R = 8,31$ Дж/моль; К – газова стала.

Знайти: $\frac{v_{\delta}}{v_i}$

Розв'язок:

Відношення швидкостей реакції дорівнює відношенню констант цих реакцій:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{k_2}{k_1}, \text{ чи, згідно з рівнянням Ареніуса:}$$

$$\frac{v_{\delta}}{v_i} = \frac{\exp\left(-\frac{E_{\text{акт.}\delta}}{RT}\right)}{\exp\left(-\frac{E_{\text{акт.}i}}{RT}\right)} = \exp\left(\frac{E_{\text{акт.}i} - E_{\text{акт.}\delta}}{RT}\right),$$

де v_{ϕ} та $v_{\text{н}}$ – швидкості; $E_{\text{акт.}\phi}$ та $E_{\text{акт.н}}$ – енергії активації ферментативної та неферментативної реакцій відповідно.

Підставляючи численні дані, отримуємо:

$$\frac{v_{\delta}}{v_i} = \exp\left(\frac{75 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 298}\right) = 5,6 \cdot 10^{11}.$$

2.3. Задачі для самостійного розв'язання

2.3.1. Основні закони рівноважної термодинаміки в біосистемах

41. Спортсмен, пробігаючи дистанцію, видихає за 1 хв 9 л повітря, у якому міститься 12% кисню і 8% вуглекислого газу. Яка витрата енергії спортсмена за 5 хв дистанції?
42. При непрямій калориметрії енергетичні витрати людини за 10 хв склали 84 кДж. Який об'єм кисню вона видихнула, якщо відомо, що у видихуваному повітрі містилося 13% кисню і 7% вуглекислого газу?
43. Кролик масою 1,5 кг поглинув за 1 годину 1,5 л кисню. Визначити скільки енергії на 1 кг маси витрачає кролик за добу, якщо середній калоричний еквівалент кисню 20,52 кДж.
44. Скільки корисної роботи може бути одержано при згоранні 1 моль глюкози, якщо припустити, що тіло людини працює, як теплова машина? ($\eta = 30\%$)
45. Дієта людини масою 70 кг містить 400 г білка (20,1 МДж/кг), 22 г жирів (39,8 МДж/кг) і 80 г вуглеводів (16,7 МДж/кг). Щодня вона піднімається на висоту 3 км і робить перед цим роботу, включаючи роботу метаболізму, у

- 4 рази перевищуючу механічну роботу підняття свого тіла на висоту 3 км. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії при такому щоденному процесі?
46. Визначити температуру м'яза, припускаючи, що він працює як теплова машина з ККД $\eta = 30\%$ при температурі $25\text{ }^\circ\text{C}$.
47. Хвилинна витрата енергії спортсмена в стані м'язового спокою становить 8 кДж. Повітря, яке він видихає, містить 14% кисню і 5% вуглекислого газу. Який об'єм повітря спортсмен видихає за 15 хв?
48. Робітник, виконуючи роботу, видихає за 1 годину 480 л повітря, у якому міститься 13% кисню і 8% вуглекислого газу. Визначити енергію, яку при цьому витрачає робітник.
49. Записати зміну вільної енергії Гіббса через зміну ентальпії, температури і ентропії. Розглянути окремий випадок ізотермічної системи.
50. В об'ємі, що розділений напівпроникною перегородкою (мембраною), знаходиться $N = 4$ молекули. Знайти число мікростанів (термодинамічну ймовірність) і ймовірність (частоту появи) кожної з конфігурацій.

2.3.2. Термодинамічні потенціали. Хімічний та електрохімічний потенціал

51. У системі відбуваються дві незалежні реакції: $M \leftrightarrow \nu_1 N$ і $X \leftrightarrow \nu_2 Y$. Вони характеризуються такими показниками: швидкостями реакцій (моль/с): $\nu_1 = 10^{-5}$, $\nu_2 = 10^{-6}$; хімічними потенціалами речовин (кДж/моль): $\mu_M = 10$, $\mu_N = 3$, $\mu_X = 20$ і $\mu_Y = 4$; стехіометричними коефіцієнтами: $\nu_1 = 2$, $\nu_2 = 3$. Знайти хімічні спорідненості цих реакцій і дисипативну функцію системи.
52. Знайти хімічний потенціал μ системи, у якій міра виродження $g = BV^N$, де B – постійна, V – об'єм системи.
53. Розрахуйте стандартний потенціал електродної реакції $\text{Cu}^{2+} + e = \text{Cu}^+$ з величин стандартних потенціалів $\varphi_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}}^0 = 0,337\text{ В}$ та $\varphi_{\text{Cu}^+/\text{Cu}}^0 = 0,521\text{ В}$.
54. Розрахуйте стандартний потенціал електродної реакції $\text{Sn}^{4+} + 4e = \text{Sn}$ з величин стандартних потенціалів $\varphi_{\text{Sn}^{4+}/\text{Sn}^{2+}/\text{Pt}}^0 = 0,150\text{ В}$ та $\varphi_{\text{Sn}^{2+}/\text{Sn}}^0 = -0,140\text{ В}$.
55. Розрахуйте стандартний потенціал $\varphi_{\text{Ti}^{2+}/\text{Ti}}^0$ з величин стандартних

потенціалів $\varphi_{\text{Ti}^{3+} / \text{Ti}}^0 = -1,208 \text{ В}$ та $\varphi_{\text{Ti}^{3+} / \text{Ti}^{2+} / \text{Pt}}^0 = -0,369 \text{ В}$.

56. Визначити мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані йонами калію за температури 18°C , якщо концентрація калію з однієї сторони мембрани дорівнює $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, а з іншої – $8 \cdot 10^{-6}$ моль/л. Зміною хімічного потенціалу нехтувати. Зміна електрохімічного потенціалу становить 180 мВ.
57. Визначити хімічний потенціал, якщо мембранний потенціал бішарової ліпідної мембрани становить 115 мВ за температури 18°C . Концентрація калію з однієї сторони мембрани дорівнює $15 \cdot 10^{-3}$ моль/л, натрію з іншої – $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Зміною електрохімічного потенціалу нехтувати.
58. Визначити хімічний потенціал, якщо електрохімічний потенціал бішарової ліпідної мембрани становить 135 мВ, мембранний потенціал – 180 мВ. Температура на мембрані 15°C . Концентрація калію з однієї сторони мембрани дорівнює $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, з іншої – $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л.
59. Визначити хімічний потенціал, якщо електрохімічний потенціал бішарової ліпідної мембрани становить 180 мВ, мембранний потенціал – 150 мВ. Температура на мембрані 15°C . Концентрація натрію з однієї сторони мембрани в 2 рази більша за концентрацію з іншої сторони.
60. Знайти хімічний потенціал μ системи, у якої міра виродження $g = e^{AV}$, де A – константа, V – об'єм системи.

2.3.3. Основи нерівноважної термодинаміки

61. Хімічна реакція відбувається при 300 К з константою швидкості $k = 10^4 \text{ с}^{-1}$. Енергія активації цієї реакції 24 кДж/моль . Оцінити частоту співударів молекул, що реагують, і зміну ентропії цієї реакції.
62. Обчисліть загальну зміну ентропії ΔS у відкритій системі, якщо відомо, що в результаті безповоротних процесів усередині неї виділилося $Q_i = 1240 \text{ кДж}$ теплоти, 25% якої передалося в довкілля. Температура системи підтримується постійною і дорівнює 37°C .
63. Обчисліть зміну стандартної вільної енергії реакції, константа рівноваги

якої $K = 10$.

64. В результаті безповоротного процесу усередині системи ентропія зростає на $\Delta S = 8,5$ кДж/К за час $t = 10$ с. Обчисліть дисипативну функцію β цього процесу, якщо система підтримується за температури $T = 300$ К.
65. Зміна вільної енергії в процесі перенесення двох електронів від відновленого нікотинамідаденіндинуклеотиду на кисні складає $\Delta G^0 = -220$ кДж/моль. Цей процес зв'язаний з синтезом трьох молекул АТФ ($\Delta G^0 = -30,5$ кДж/моль). Обчисліть ефективність η сполуки.
66. Обчисліть енергію диполь-дипольної взаємодії молекул етилового спирту, що знаходяться у водному розчині ($\epsilon = 80$) на відстані $r = 1,2$ нм при температурі $t = 17$ °С. Дипольний момент молекули етилового спирту $p = 5,67 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.
67. Сила взаємодії молекул води і кисню на відстані $r = 0,3$ нм дорівнює $F = 0,06$ пН. Обчисліть поляризуємість a молекул кисню. Дипольний момент води $p = 6,1 \cdot 10^{-30}$ Кл·м; діелектрична проникність середовища $\epsilon = 80$.
68. Денатурація деякого білку відбувається за температури $t = 45$ °С і супроводжується зміною ентальпії на величину $\Delta H = 175$ кДж/моль. Обчисліть зміну ентропії ΔS .
69. Розрахуйте константу дисоціації нуклеотидного ланцюга, що складається з чотирьох пар нуклеотидів, якщо константа дисоціації однієї пари нуклеотидів дорівнює $1/7$.
70. Визначте ефективний радіус r_0 ван-дер-ваальсової взаємодії атомів вуглецю і азоту. Емпіричні константи потенціалу Ленарда-Джонса дорівнюють $A = 907,2 \cdot 10^{-9}$ та $B = 1537,2 \cdot 10^{-6}$ кДж·нм⁶/моль.

2.4. Контрольні питання

1. Чому в медичних термометрах використовується ртуть, а не спирт або вода?
2. Чому в гірських районах, розташованих на висотах більше 3500 м над рівнем моря, навіть у здорових людей з'являється задишка, запаморочення,

часте серцебиття?

3. Чи кипітиме вода в пробірці, опущеній в колбу з окропом («водяна лазня»)?
Чому?
4. Чому, якщо подихати собі на руку, виходить відчуття тепла, а якщо подути - відчуття холоду?
5. У посудині, наповненій по самі вінця водою, плаває шматок льоду. Чи виллється вода з посудини, коли розтане лід?
6. У чому полягає особливість застосування II початку термодинаміки до живих систем?
7. Що означає перехід живої системи в рівноважний стан?
8. У чому суть теореми Пригожина для відкритих термодинамічних систем за незмінних умов?
9. Що отримує організм з довкілля для того, щоб ентропія системи не зростала?
10. У чому полягає завдання управління в живій системі?
11. Яким чином жива система вирішує задачу управління?
12. Які функції організованих систем забезпечує управління?
13. Які функції організованих систем забезпечує регулювання?
14. Дайте визначення гомеостазу.
15. Що таке зворотний зв'язок?
16. Поясніть поняття позитивного та негативного зворотного зв'язку.
17. Поясніть ієрархію цілей управління в живих системах.
18. В чому полягають особливості нерівноважної термодинаміки?
19. Роз'ясніть суть часу релаксації.
20. Викладіть основи правила фаз Гіббса.
21. Запишіть принцип лінійності нерівноважної термодинаміки та співвідношення взаємності Онзагера.
22. Запишіть формулювання Пригожина для зміни ентропії.
23. Сформулюйте закон швидкості зростання ентропії та дайте відповідні пояснення.

3. МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА

Третій розділ містить практичні завдання з основ молекулярної біофізики, куди входять задачі на визначення кінетичних характеристик простих хімічних реакцій; процесів масоперенесення в середовищах, активного та пасивного транспорту речовини через тонкі біологічні мембрани, а також потенціалу спокою та потенціалу дії нервових волокон [10, 25]. Основні закони, що необхідно використовувати для розв'язання задач даного розділу це: правило Вант-Гоффа, рівняння Фіка, Нернста, Нернста-Планка, Стокса-Ейнштейна, Гольдмана, Уссінга, Доннана, тощо [11, 20].

3.1. Основні теоретичні відомості

Основи молекулярної біофізики.

В основі молекулярної біофізики лежить кінетичне рівняння хімічного перетворення – визначення залежності швидкості хімічної реакції від концентрації компонентів реакційної суміші. Для простої (однотадійної) гомогенної реакції швидкість v пропорційна добутку концентрацій реагуючих речовин, у результаті чого кінетичне рівняння простої хімічної реакції набуває вигляду:

$$v = k[A][B], \quad (61)$$

де k – константа швидкості реакції, $[A]$, $[B]$ – відповідно, концентрація речовин A та B , що вступають у реакцію.

Залежність швидкості реакції від концентрації реагуючих речовин:

$$v = k[X]^m, \quad (62)$$

де m – порядок реакції.

Швидкість зменшення концентрації реагенту A :

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]. \quad (63)$$

Складна реакція перебігає у декілька стадій, сукупність і послідовність яких становить механізм реакції. Передбачуваний механізм реакції називається її кінетичною схемою.

Кінетика складної реакції описується системою диференціальних рівнянь, яка, як правило, вирішується за допомогою ЕОМ.

Необхідно розрізнити емпіричне рівняння, яке складається з експериментальних значень v при варіюванні концентрацій усіх речовин, що беруть участь у реакції, і теоретичне кінетичне рівняння, яке виводиться з передбачуваної кінетичної схеми реакції.

Співпадання емпіричного рівняння з теоретичним свідчить про вірогідність кінетичної схеми реакції.

Глибина і вибірковість, які досягаються в хімічних реакціях, залежать від фізико-хімічних характеристик реагуючої системи (кінетичної складності й порядку реакції, теплового ефекту, енергії активації, стабільності властивостей каталізатора тощо), з одного боку, і від способу проведення реакції, який залежить від технологічного типу реактора, з іншого.

Хімічні реакції можуть мати різне технологічне і конструктивне оформлення. Зіставлення і вибір оптимального варіанта необхідно здійснювати з урахуванням капітальних і експлуатаційних витрат для усієї технологічної установки в цілому і відносити до одиниці цільового продукту.

Для вивчення існуючих і розроблювальних моделей хіміко-фармацевтичних технологічних систем застосовують стратегію системного аналізу, відповідно до якої виробляється декомпозиція вихідної складної системи на ряд підсистем меншої складності.

При цьому кожна з підсистем розглядається як самостійна, а її навколишнє середовище включає інші підсистеми. Кількісний зв'язок вихідних перемінних із вхідними, які спричиняють і керують впливами, відображений у математичній моделі хіміко-фармацевтичної технологічної системи.

Основний прийом її побудови – це так званий блоковий принцип, відповідно до якого кожен елементарний процес досліджується окремо (за блоками) в умовах, максимально наближених до існуючого й очікуваного режиму експлуатації об'єкта моделювання.

У результаті для кожного елемента схеми розробляється відповідна математична модель, що описує його властивості.

Математичне описання формується об'єднанням на попередніх етапах системного аналізу математичних моделей елементів у єдину систему рівнянь. Вирішення системи рівнянь математичного опису для заданої сукупності значень вхідних перемінних і становить основу математичного моделювання, що дозволяє досліджувати властивості об'єкта з використанням чисельних експериментів на його математичній моделі.

Математична модель дає можливість прогнозувати поведження об'єкта при змінах вхідних перемінних, вирішувати завдання оптимального вибору конструктивних характеристик, синтезувати системи рівнянь, які забезпечують задані показники його функціонування.

При цьому важливе значення має вибір алгоритму рішення системи рівнянь математичного описання.

Як правило, математичне описання реальних об'єктів виявляється настільки складним, що для реалізації математичного моделювання необхідно використовувати досить потужні засоби обчислювальної техніки.

Значний внесок у дослідному дослідженні впливу температури на швидкість реакції зробив Вант-Гофф.

Правило Вант-Гоффа – емпіричне правило, яке дозволяє в першому наближенні оцінити вплив температури на швидкість протікання хімічної реакції в невеликому температурному інтервалі (зазвичай від 0 °С до 100 °С) і який на основі багатьох експериментів сформулював наступне правило: при збільшенні температури на кожні 10 °С константа швидкості гомогенної елементарної реакції збільшується в два-чотири рази.

Правило Вант-Гоффа:

$$\frac{v_{t2}}{v_{t1}} = \gamma^{\frac{t2-t1}{10}}, \quad (64)$$

де γ – температурний коефіцієнт; v_{t1} , v_{t2} – швидкість хімічної реакції при відповідних температурах.

Правило Вант-Гоффа має обмежену область застосування.

Багато реакцій йому не підкоряються, наприклад, реакції, що відбуваються при високих температурах, дуже швидкі та дуже повільні реакції.

Правилу Вант-Гоффа також не підкоряються реакції, в яких беруть участь великі молекули, наприклад, білки в біологічних системах.

Температурну залежність швидкості реакції більш коректно описує *рівняння Арреніуса*.

Активаційний закон дифузії – формула, яка визначає залежність коефіцієнту дифузії (або швидкості реакції) від температури (рівняння Арреніуса).

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}, \quad (65)$$

де E_a – енергія активації (енергетичний бар'єр, який переборюють молекули для перебігу реакції) [Дж] – визначає температуру, вище якої швидкість реакції стає значною; A – передекспоненційний множник (частота зіткнень реагуючих молекул)

Процеси, що відбуваються в клітині, такі, як збудження, обмін речовин, синтез АТФ, підтримання постійного йонного складу, вміст води та інші, залежать від перенесення речовин через біологічні мембрани.

Зміна швидкості перенесення речовин призводить до порушення водного сольового обміну, збудливості клітин, біоенергетичних та інших процесів.

Процеси вибірного перенесення речовин через біомембрани називають транспортом.

Розрізняють активний та пасивний транспорт.

Транспорт речовин через клітинну мембрану називають пасивним, якщо на нього не витрачається клітинна хімічна енергія АТФ, і активним, якщо витрачається енергія АТФ.

В основі теорії дифузії лежать закони Фіка (Адольф Фік, 1855 рік) та рівняння Теорела (Аксель Гуго Теодор Теорель, 1930 рік).

Закон Фіка для дифузії речовин:

$$\hat{O} = -D \frac{dc}{dx} \text{ [кг/с·м}^2\text{]}, \quad (66)$$

де Φ – потік речовини через одиничну площину; D – коефіцієнт дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$] (знак « \rightarrow » показує, що потік речовини напрямлений в бік зменшення концентрації речовини, тобто в сторону протилежну напрямку градієнта концентрації),

$\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації [кг·м^{-4}].

При рівномірній зміні концентрації: $\frac{dc}{dx} = \frac{c_2 - c_1}{l}$,

де c_2, c_1 – відповідно, концентрації речовини на початку та після певного часу протікання процесу дифузії [кг·м^{-3}]; l – товщина шару [м].

Рівняння Теорела для потоку речовини:

$$\hat{O} = -\frac{Dc}{RT} \cdot \frac{d\mu}{dx} \text{ [кг/с·м}^2\text{]}, \quad (67)$$

де c – концентрація речовини [м^{-3}]; D – коефіцієнт дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$]; $R = 8,31 \text{ Дж/моль·К}$ – універсальна газова стала; T – термодинамічна температура [К]; $d\mu/dx$ – градієнт електрхімічного потенціалу [В/м].

Середня величина зміщення молекули речовини в розчинах (вільний пробіг молекули):

$$\bar{\lambda} = \sqrt{2Dt} \text{ [м]}, \quad (68)$$

де t – час спостереження [с]; D – коефіцієнт дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$].

Дифузія сферичних частинок в рідині (рівняння Стокса-Ейнштейна):

$$D = \frac{k_B}{6\pi \cdot r \cdot \eta} T \text{ [м}^2/\text{с]}, \quad (69)$$

де $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ моль}^{-1}$ – стала Больцмана, r – радіус частинок [м], η – в'язкість середовища [Па·с].

Клітинна мембрана – зовнішня оболонка живої клітини, яка відокремлює цитоплазму клітини від навколишнього середовища.

Складається з двох шарів ліпідів, також містить білки і вуглеводи. Клітинна мембрана є напівпроникним бар'єром, що вибірково пропускає молекули всередину клітини та з неї назовні.

Проникність мембрани:

$$P = \frac{D \cdot k}{l} \text{ [м/с]}, \quad (70)$$

де D – коефіцієнт дифузії речовини в матеріалі мембрани [$\text{м}^2/\text{с}$]; l – товщина мембрани [м]; $k = c_{me}/c_e = c_{me}/c_i$ – коефіцієнт розподілу речовини між мембраною і водною фазою.

Структури мембрани підтримують сталий вміст води, йонів, речовин всередині клітини. Плазмалема часто містить додаткові утворення для руху, захисту, живлення, взаємодії з іншими клітинами.

Плазматична мембрана дозволяє потрапляти до клітини певним молекулам та йонам, наприклад, глюкозі, амінокислотам і ліпідам.

Це напіврідкий шар молекул, зокрема протеїнів і фосфоліпідів, деякі з яких постійно рухаються, надаючи мембрані рухливості.

Середньоквадратичне переміщення, що відбувається за час t (ізотропна двовимірна дифузія):

$$x_{\text{нб.еа}} = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t} \text{ [м]}, \quad (71)$$

де D – коефіцієнт дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$].

При цьому густина потоку речовини крізь мембрану:

$$J = P \cdot \Delta c \text{ [моль/м}^2\text{·с]}, \quad (72)$$

де P – проникність мембрани [м/с]; Δc – зміна концентрації речовини [моль/м^3].

Рух ліпідних молекул може бути паралельним та поперечним до поверхні мембрани.

Рух, паралельний поверхні, – латеральна дифузія.

Це рух у двовимірному просторі бішару, зміна орієнтації полярних голівок, коливання жирнокислотних ланцюгів, а також обертальна рухомість навколо довгої осі.

Поперечний рух – повільний обмін компонентами моношарів (фліп-флоп), за якого молекула має не тільки переміститися в інше місце, але й повернутися, оскільки її полярна голівка повинна бути напрямлена в протилежний бік.

Частота пересkokів молекул внаслідок латеральної дифузії:

$$v = 2\sqrt{3} \cdot \frac{D}{S} \text{ [с}^{-1}\text{]}, \quad (73)$$

де D – коефіцієнт латеральної дифузії [$\text{м}^2/\text{с}$]; S – площа однією молекули на поверхні мембрани [м^2].

Час осілого життя молекули в одному положенні:

$$\tau = \frac{1}{v} = \frac{A}{2\sqrt{3} \cdot D} \text{ [с]}, \quad (74)$$

де A – площа займана молекулою на мембрані [м^2].

Теорія абсолютних швидкостей реакцій, на відміну від теорії зіткнень, розглядає хімічну реакцію як складний багатоступеневий процес взаємодії ядер та їхніх електронних оболонок, а не просто зіткнень двох «кульок».

За теорією абсолютних швидкостей реакцій перехід реагуючих молекул у продукти реакції здійснюється через проміжний стан зі збільшеною енергією, який називають активованим комплексом.

Утворення такого комплексу лімітує швидкість проходження будь-якої хімічної реакції.

За теорією перехідного стану швидкість реакції визначається швидкістю проходження хімічної реакції через вершину потенціального бар'єра (рівняння Ейрінга):

$$K_p = \frac{[X^*]}{[A][B]} \quad (75)$$

де $[X^*]$ – зміна кількості продукту хімічної реакції; $[A]$, $[B]$ – відповідно, зміна кількості однієї із речовин (А або В), між якими відбувається хімічна реакція за одиницю часу в одиниці реакційного простору.

При цьому, стала швидкості реакції під дією випадкової сили (теорія Крамерса):

$$k(T, \eta) = \left(\frac{A}{\eta} \right) \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (76)$$

де η - в'язкість мікросередовища [Па·с]; E_a – енергія активації реакції [Дж]; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана [Дж/К]; T – термодинамічна температура за якої протікає реакція [К].

Фільтрація – процес проходження розчину чи суспензії через пористу перегородку (мембрану) за різницею гідростатичного тиску з обох боків мембрани, причому розмір профільтрованих часточок обмежується діаметром пор.

Швидкість фільтрації визначається, як відношення об'ємної витрати рідини чи газу Q [м³/с] до площі фільтрації S [м²]:

$$v = \frac{Q}{S} \text{ [м/с]}. \quad (77)$$

Критична швидкість фільтрації – швидкість фільтрації, за якої порушується закон Дарсі у верхній границі при великих її значеннях, тобто при великих градієнтах тиску (наприклад, коли ламінарний рух підземної води переходить у турбулентний).

При цьому, швидкість перенесення при фільтрації (закон Пуазейля):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_1 - p_2}{w}, \quad (78)$$

де $\frac{dv}{dt}$ – об'ємна швидкість перенесення розчину, p_1, p_2 – відповідно, тиск на початковій та кінцевій ділянці перенесення розчину [Па]; w – гідравлічний опір [Па·с/м³].

Для випадку активного транспорту речовини через мембрани, першочергово мають бути визначені рухливість зарядженої частинки та час встановлення рівноважної концентрації речовини у розчині.

Рухливість зарядженої частинки (йона):

$$b = \frac{v}{E} \text{ [м}^2\text{/В}\cdot\text{с]}, \quad (79)$$

де E – напруженість електричного поля [В/м].

Співвідношення Ейнштейна:

$$D = \frac{bRT}{zF} \text{ [м}^2\text{/с]}, \quad (80)$$

де b – рухливість [м²/В·с]; $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – абсолютна температура [К]; z – валентність йонів при їх транспортуванні через мембрану; $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів).

Час встановлення рівноважної концентрації речовини у розчині:

$$t_{1/2} = 0,693 \cdot \frac{V}{P \cdot S} \text{ [с]}, \quad (81)$$

де V – об'єм розчину [м³]; S – площа поверхні [м²], що обмежує об'єм V ; P – коефіцієнт проникності [м/с].

Густина потоку речовини через тонку границю (мембрану):

$$j = D \frac{c_{me} - c_{ms}}{l} = \frac{Dk}{l} (c_e - c_i) = P(c_e - c_i) \quad (82)$$

де c_{me} і c_{ms} – концентрація речовини в мембранних шарах, що контактують з зовнішнім середовищем (e) і внутрішнім середовищем (i); c_e та c_i – концентрації речовини зовні і в клітині; l – товщина мембрани [м]; D – коефіцієнт дифузії речовини в матеріалі мембрани [м²/с].

Рівняння Нернста-Планка, що визначає густину потоку речовини через нерівномірність розподілу її у просторі (градієнт концентрації dc/dx) і під дією електричного поля (наявність електричного заряду у частинок і градієнту електричного поля $d\phi/dx$):

$$\hat{O} = -D \frac{dc}{dx} - bc \frac{d\phi}{dx} = \frac{bRT}{zF} \frac{dc}{dx} - bc \frac{d\phi}{dx}, \quad (83)$$

де $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів); b – рухливість йонів.

Окремими випадками Рівняння Нернста-Планка є рівняння Нернста для рівноважного та мембранного потенціалів.

Рівняння Нернста для рівноважного потенціалу:

$$\Delta\varphi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c^i}{c^e} \text{ [В]}. \quad (84)$$

де $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – абсолютна температура [К]; $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів); c^e та c^i – концентрації речовини ззовні та в середині клітини.

Рівняння Нернста для мембранного потенціалу (за теорією Бернштейна):

$$\Delta\varphi_M = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_0} \text{ [В]}, \quad (85)$$

де $[K^+]_0$; $[K^+]_i$ – концентрації йонів калію зовні (e) і всередині (i) клітини.

Трансмембранний потенціал:

$$\Delta\varphi = -\frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{P_K \cdot \left(c + \frac{\delta}{2}\right) + P_{Cl} \cdot c}{P_K \cdot c + P_{Cl} \cdot \left(c - \frac{\delta}{2}\right)} \text{ [В]}. \quad (86)$$

де $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – абсолютна температура [К]; $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів); P_K ; P_{Cl} – відносні проникності йонів калію і хлору через мембрану [мМ]; c – концентрація йонів в мембрані [мМ]; δ - активність йонів [мМ].

Величина трансмембранного потенціалу мала і не пояснює великого значення потенціалу спокою.

Пошкодження клітини призводить до зниження потенціалу спокою (підвищується проникність мембрани, різниця значень коефіцієнтів проникності для K^+ і Na^+ зменшується) до рівня доннанівського потенціалу

Доннанівська рівновага встановлюється між клітиною і середовищем, якщо мембрана добре проникна для неорганічних йонів, але непроникна для білків та інших великих органічних йонів.

Якщо всередині клітини або поза нею є заряджені макромолекули, які нездатні проникати через мембрану, то вони справляють істотний вплив на розподіл йонів між клітиною і позаклітинним середовищем.

У результаті на мембрані виникає різниця потенціалів, яка називається доннанівським потенціалом.

У цьому разі рівноважні концентрації йонів одного й того ж виду можуть бути різними по обидва боки мембрани.

Потенціал Доннана:

$$\Delta\varphi = -\frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{\frac{c^2}{\delta} + \delta}{c} = -\frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \left(\frac{c}{\delta} + \frac{\delta}{c} \right) \approx -\frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{\delta}{c} \quad [\text{В}]. \quad (87)$$

Рівняння Гендерсона для електродифузійного потенціалу:

$$\Delta\varphi_{\text{Генд}} = \frac{\hat{a}^+ - \hat{a}^-}{\hat{a}^+ + \hat{a}^-} \frac{RT}{ZF} \ln \frac{c_e}{c_i} \quad [\text{В}], \quad (88)$$

де v^+ , v^- - електрофоретична рухливість йонів («-» - аніонів, «+» - катіонів), $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – абсолютна температура [К]; $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів); Z – валентність йону; c – концентрація йонів в мембрані [мМ]; c^e та c^i – концентрації речовини ззовні та в середині клітини, δ - активність йонів [мМ].

Рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца для мембранного потенціалу, з урахуванням теорії постійного поля і стаціонарності потоків йонів через мембрану:

$$\Delta\varphi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{P_{\hat{E}} C_{\hat{E}}^i + P_{\text{Na}} C_{\text{Na}}^i + P_{\text{Cl}} C_{\text{Cl}}^i}{P_{\hat{E}} C_{\hat{E}}^e + P_{\text{Na}} C_{\text{Na}}^e + P_{\text{Cl}} C_{\text{Cl}}^e} \quad [\text{В}]. \quad (89)$$

де P_K ; P_{Na} ; P_{Cl} – відносні проникності йонів калію, натрію і хлору через мембрану;

$$\left. \begin{array}{l} [K^+]_e; [K^+]_i \\ [Na^+]_e; [Na^+]_i \\ [Cl^-]_e; [Cl^-]_i \end{array} \right\} \text{концентрація йонів зовні (e) і всередині (i) клітини.}$$

Це рівняння показує, що електричний потенціал на мембрані визначається різницею стаціонарних концентрацій йонів по обидва боки мембрани та значеннями коефіцієнтів їх проникності.

Відповідно найбільший вплив на мембранний потенціал справляє той йон, який має найвище значення коефіцієнта проникності, що і спостерігається в експериментах.

Оскільки у спокої проникність клітини для йонів калію набагато більша від її проникності для інших йонів, то потенціал спокою визначається переважно різницею концентрацій йонів калію.

Теорія постійного поля ґрунтується на принципі незалежності: ймовірність перетину мембрани йоном у деякому інтервалі часу не залежить від наявності інших йонів.

Потік йонів можна розділити на два різнонаправлені потоки: потік, що входить у клітину (\vec{j}) та потік, що виходить з клітини (\vec{j}). Тоді відношення потоків є критерієм незалежності одного від одного протилежно напрямлених потоків йонів крізь мембрану (рівнянням Уссінга).

Відношення потоків йонів крізь мембрану при пасивному транспорті
(рівняння Уссінга):

$$\frac{\vec{j}}{j} = \frac{C_K^e}{C_K^i} \cdot e^{-\frac{ZF\Delta\phi}{RT}} \quad (90)$$

де C_K^e , C_K^i - концентрація йонів калію зовні (e) і всередині (i) клітини; $F = 9,6 \cdot 10^4$ Кл/моль – стала Фарадея (електричний заряд одного моля йонів); Z – валентність йону; $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – абсолютна температура [К]; $\Delta\phi$ - мембранний потенціал [мВ].

Електропровідність клітин мембран дуже низька і становить 10^{-3} Ом·см⁻².

Для порівняння: провідність шару водного розчину КСІ з концентрацією 0,01 М такої самої товщини – 10^4 Ом·см⁻². Різниця досягає 10^7 разів.

Провідність мембрани визначають за концентрацією і рухливістю наявних в ній заряджених частинок.

Низька діелектрична проникність гідрофобного ліпідного бішару $\epsilon \approx 2 \dots 3$ дуже несприятлива для проникнення. Значення енергії у цьому разі велике (~ 110 еВ). Саме це створює бар'єр, що перешкоджає проходженню йонів через гідрофобну частину мембрани в негідратованій формі.

Таким чином, величина енергетичного бар'єра в мембрані зменшується, і відповідно проникність мембрани для йона зростає у міру збільшення радіуса йона і з наближенням значень $\epsilon_{\text{ліп}}$ і $\epsilon_{\text{вод}}$.

Ці фізичні принципи і є основою перенесення йонів йонофорами. Йонофори можуть утворювати з йонами комплекси великих розмірів (переносники) або формувати пори в мембрані, заповнені водою (канали).

Розрахунок кожного з цих ефектів має такі результати:

1. Оскільки мембрана має кінцеву товщину, на межі між мембраною і водною фазою виникають сили утворення.

Електростатична енергія в центрі мембрани знижується за рахунок сил утворення на величину:

$$\Delta W = \frac{e^2}{\epsilon_{\text{в}} \cdot l_0} \cdot \ln \frac{2\epsilon_{\text{ліп}}}{\epsilon_{\text{в}} + \epsilon_{\text{ліп}}} \quad [\text{Дж}]. \quad (91)$$

де e – електричний заряд йонів [Кл]; $\epsilon_{\text{ліп}}$ і $\epsilon_{\text{вод}}$ – діелектрична проникність ліпідного бішару та водного розчину; l_0 – товщина мембрани [нм].

2. Утворення йонних пар з двох розміщених поблизу сфер унаслідок йонної взаємодії також не дає помітного виграшу.

Електростатична енергія двох частинок, які розділені відстанню d :

$$W = \frac{e^2}{2\epsilon_{\text{в}} \cdot a_+} + \frac{e^2}{2\epsilon_{\text{в}} \cdot a_-} - \frac{e^2}{\epsilon_{\text{в}} \cdot d} \quad [\text{Дж}]. \quad (92)$$

де a_+ , a_- - радіус сфер йонів різних знаків [нм]; d – відстань між частинками, що утворюють йонну пару (дипольне плече) [нм].

3. Існують молекули (йонофори), які переносять йони через мембрану – індукований йонний транспорт. Наявність йонофорів сприяє багатократному підвищенню провідності мембран.

Нехай нейтральна молекула з високою поляризованістю може утворювати сферичний комплекс з йоном.

Якщо зовнішній радіус комплексу дорівнює b , то його енергія в середовищі має вигляд:

$$W_i = \frac{e^2}{2\varepsilon_{\text{ліп}} \cdot b} + \frac{e^2}{2\varepsilon_{\text{к}}} \cdot \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \text{ [Дж]}. \quad (93)$$

де e – електричний заряд йонів, що переносяться йонофорами [Кл]; $\varepsilon_{\text{ліп}}$ і $\varepsilon_{\text{к}}$ – діелектрична проникність ліпідного бішару та комплексу йонофору з йоном; a – радіус йону [нм]; b – зовнішній радіус йонного комплексу [нм].

4. Пори з високою поляризованістю можуть значно знизити енергію заряду в мембрані.

Якщо радіус пори $b \ll 10$ нм, енергія частинки на осі пори:

$$W_i = \frac{e^2}{2\varepsilon_i \cdot a} + \frac{e^2}{\varepsilon_{\text{ліп}} \cdot b} \cdot P \left(\frac{\varepsilon_{\text{ліп}}}{\varepsilon_i} \right) \text{ [Дж]}. \quad (94)$$

де e – електричний заряд йонів [Кл]; $\varepsilon_{\text{ліп}}$ і $\varepsilon_{\text{п}}$ – діелектрична проникність ліпідного бішару та пори; a – радіус йону [нм]; b – радіус пори [нм]; P – відносна проникність йонів через пору.

3.2. Приклади розв'язання типових завдань

Приклад 12. Якщо температурний коефіцієнт реакції дорівнює 2, то на скільки градусів треба збільшити температуру для збільшення швидкості реакції у 16 разів?

Дано: $\gamma = 2$; $v_{t2} / v_{t1} = 16$.

Знайти: Δt

Розв'язок:

Залежність швидкості хімічної реакції від температури визначає правило Вант-Гоффа (64), яким ми скористаємося при розв'язуванні задачі. Правило Вант-Гоффа говорить, що при підвищенні температури на кожні 10 °С відбувається збільшення швидкості реакції у 2-4 рази.

Математично, правило Вант-Гоффа виражається формулою:

$$\frac{v_{t_2}}{v_{t_1}} = \gamma^{\frac{t_2 - t_1}{10}},$$

де γ – температурний коефіцієнт; v_{t_1} , v_{t_2} – швидкість хімічної реакції при відповідних температурах.

Враховуючи те, що за умовою задачі температурний коефіцієнт дорівнює 2, а збільшення швидкості реакції відбулося у 16 разів, обчислимо, як необхідно змінити температуру в системі:

$$16 = 2^{\frac{\Delta t}{10}}; 2^4 = 2^{\frac{\Delta t}{10}}; \frac{\Delta t}{10} = 4 \text{ або } \Delta t = 40^\circ.$$

Тобто, температуру в системі треба збільшити на 40°C .

Приклад 13. Знайти середню величину зміщення молекули формаміду у воді та у розчині сахарози за 1 хв, якщо коефіцієнти дифузії цієї речовини у воді і сахарозі відповідно дорівнюють $1,6 \cdot 10^{-5}$ та $0,3 \cdot 10^{-5}$ $\text{см}^2/\text{с}$.

Дано: $D_1 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_2 = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 1 \text{ хв} = 60 \text{ с}$.

Знайти: $S_{\text{сер.кв.}}$

Розв'язок:

Середнє квадратичне переміщення молекул:

$$S_{\text{н.д.д.}} = 2\sqrt{D_1\tau} = 2\sqrt{1,6 \cdot 10^{-9} \cdot 60} = 0,619 \text{ мм},$$

$$S_{\text{н.д.д.}} = 2\sqrt{D_2\tau} = 2\sqrt{0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 60} = 0,268 \text{ мм}.$$

Приклад 14. Розрахуйте коефіцієнт D латеральної дифузії фосфоліпідів, якщо середній час їхнього осілого життя складає $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с.

Площа займана молекулою на мембрані складає $A = 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$.

Дано: $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с; $A = 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$.

Знайти: D .

Розв'язок:

Час осілого життя молекули (74) зворотно пропорційний частоті перескоків молекул на мембрані внаслідок латеральної дифузії: $\tau = \frac{1}{\nu} = \frac{A}{2\sqrt{3} \cdot D}$, звідки

маємо коефіцієнт латеральної дифузії фосфоліпідів: $D = \frac{A}{2\sqrt{3} \cdot \tau}$.

$$D = \frac{5,5 \cdot 10^{-19}}{2\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^{-8}} = 3,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Приклад 15. Знайти коефіцієнт проникності плазматичної мембрани *Mycoplasma* для формаміду, якщо при різниці концентрацій цієї речовини всередині і зовні мембрани, рівної $0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л, густина потоку її крізь мембрану дорівнює $8 \cdot 10^{-7}$ моль/см²·с.

Дано: $J = 8 \cdot 10^{-7}$ моль/см²·с = $8 \cdot 10^{-11}$ моль/м²·с; $\Delta c = 0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Знайти: P .

Розв'язок:

Коефіцієнт проникності (70): $D = \frac{DK}{l}$, а за законом Фіка (72):

$$J = \frac{DK\Delta c}{l} = D \cdot \Delta c. \text{ Тоді, } D = \frac{J}{\Delta c} = \frac{8 \cdot 10^{-11}}{5 \cdot 10^{-4}} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Приклад 16. Різниця концентрацій молекул речовини на мембрані деякої клітинки дорівнює $\Delta c = 45$ ммоль/л, коефіцієнт розподілення між мембраною та навколишнім середовищем $K = 30$, коефіцієнт дифузії – $D = 1,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с, густина потоку $J = 25$ ммоль/м²·с. Розрахуйте товщину l цієї мембрани.

Дано: $J = 25$ ммоль/м²·с = $25 \cdot 10^{-3}$ моль/м²·с; $\Delta c = 45$ ммоль/л = $4,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $K = 30$; $D = 1,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Знайти: l .

Розв'язок:

Із рівняння Фіка (72): $J = \frac{DK \cdot \Delta c}{l}$, отримаємо: $l = \frac{DK \cdot \Delta c}{J}$.

$$\text{Тоді, } l = \frac{1,5 \cdot 10^{-10} \cdot 30 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}}{25 \cdot 10^{-3}} = 8,1 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 8,1 \text{ нм.}$$

Приклад 17. Потенціал спокою нерва кінцівки краба дорівнює 89 мВ.

Чому дорівнює концентрація йонів калію всередині нерва, якщо зовні вона складає 12 ммоль/л. Температуру вважати рівною 20 °С.

Дано: $[K^+]_0 = 12 \text{ ммоль/л} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$; $\Delta\varphi = 89 \text{ мВ} = 89 \cdot 10^{-3} \text{ В}$; $T = 293 \text{ К}$.

Табличні величини, константи: $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ – газова стала; $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}\cdot\text{В}$ – стала Фарадея.

Знайти: $[K^+]_i$.

Розв'язок:

За рівнянням Нернста (85): $\Delta\varphi = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i}$, звідки $[K^+]_i = \frac{[K^+]_o}{\exp\left(\frac{\Delta\varphi \cdot F}{RT}\right)}$.

$$[K^+]_i = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{89 \cdot 10^{-3} \cdot 96500}{8,31 \cdot 293}\right)} = 3,52 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л.}$$

3.3. Задачі для самостійного розв'язання

3.3.1. Основи молекулярної біофізики

71. Як зміниться швидкість реакції $2\text{NO}(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{NO}_2(\text{г})$, якщо збільшити тиск в системі в 3 рази.
72. Як зміниться швидкість реакції $2\text{NO}(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{NO}_2(\text{г})$, якщо зменшити об'єм системи в 2 рази.
73. Як зміниться швидкість реакції $2\text{NO}(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{NO}_2(\text{г})$, якщо підвищити концентрацію в 3 рази.
74. У скільки разів потрібно збільшити концентрацію кисню (O_2), щоб швидкість прямої реакції збільшилася в 3 рази? $2\text{SO}_2(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{SO}_3(\text{г})$
75. У скільки разів необхідно збільшити концентрацію сірководню (H_2S) чи оксиду сірки (IV) (SO_2), щоб в обох випадках швидкість реакції зросла в 9 разів для реакції: $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 = 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$.

76. Як необхідно змінити температуру в системі, щоб швидкість хімічної реакції збільшити в 81 раз. Температурний коефіцієнт дорівнює 3?
77. У скільки разів зменшиться швидкість реакції при зниженні температури газової суміші зі значення 120°C до 80°C, якщо температурний коефіцієнт дорівнює 3?
78. Температурний коефіцієнт швидкості деякої реакції дорівнює 2,3. Вкажіть, як зміниться швидкість цієї реакції при підвищенні температури на 20°C.
79. Температурний коефіцієнт деякої хімічної реакції дорівнює 4. Як зміниться швидкість цієї хімічної реакції при нагріванні реакційної суміші від 20°C до 50°C?
80. Константа швидкості розкладання перекису водню дорівнює 0,05 хв⁻¹. Чому дорівнює період напіврозпаду.

3.3.2. Дифузійні явища в біологічних системах

81. Який коефіцієнт дифузії для йонів натрію у воді при 18°C, якщо за одну секунду середня величина зміщення складає $4,5 \cdot 10^{-4}$ см?
82. Густина потоку речовини через мембрану клітини дорівнює 10^{-9} моль·м/с. Різниця концентрації речовини, яка ініціює цей процес – $6 \cdot 10^{-4}$ моль. Який коефіцієнт проникності мембрани?
83. Потік молекул речовини через мембрану ліпосоми товщиною 10 м рівномірний і дорівнює $5 \cdot 10^{-6}$ моль·м/с. Різниця концентрації по обидва боки мембрани – $2 \cdot 10^{-2}$ моль. Чому дорівнює коефіцієнт дифузії для цієї речовини?
84. У скільки разів відрізняється час встановлення рівноважної концентрації в гігантських нервових клітинах моллюска діаметром 1 мм і в нейронах мозку людини діаметром 10 мкм? Всі інші параметри вважати однаковими.
85. Скільки частинок проходить через поверхню ліпосоми за одну секунду, якщо густина потоку через її мембрану $8 \cdot 10^{-6}$ моль·м/с? Радіус ліпосоми 10^{-5} м.

86. Який градієнт концентрації речовини, якщо на дні посудини шар розчину сахарози 0,1 моль, а на поверхні води 0,01 моля? Висота стовпа рідини в посудині 10 см.
87. Через площину площею 10 см^2 дифундує речовина з області концентрації 0,1 моль в область з концентрацією 0,01 моль. Яка величина потоку речовини, що проходить через площину, якщо відстань між областями з різними концентраціями 10 см, а коефіцієнт дифузії – $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$?
88. Визначити величину коефіцієнта дифузії для речовини, розчиненій у воді, коли при градієнті концентрації 100 моль/см, густина потоку речовини дорівнює $5 \cdot 10^{-6} \text{ моль} \cdot \text{м}/\text{с}$.
89. За який час встановлюється рівноважна концентрація речовини в клітині, якщо її об'єм відноситься до площі поверхні, як 2,6:1,3? Проникність оболонки становить $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$.
90. Для «заповнення» ліпосом, їх розмістили в розчин речовини, яка легко проходить через мембрану ліпосом. Проникність речовини – $2 \cdot 10^5 \text{ м}/\text{с}$. Концентрація речовини у розчині – 0,1 моля. Яка густина потоку речовини, що дифундує через мембрану ліпосоми?

3.3.3. Біологічні мембрани. Транспорт речовини через біологічні мембрани

91. Визначити рівноважний мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані йонами калію при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо концентрація калію з однієї сторони мембрани дорівнює $10^{-3} \text{ моль}/\text{л}$, а з другої – $10^{-5} \text{ моль}/\text{л}$.
92. На бішаровій ліпідній мембрані виник потенціал 80 мВ. Визначити, чому дорівнює заряд 1 см^2 поверхні мембрани, якщо відносна діелектрична проникність ліпідів $\epsilon = 2$. Товщина мембрани $d = 4 \text{ нм}$.
93. Концентрація йонів Na^+ у клітині дорівнює $15 \text{ ммоль}/\text{л}$, а в оточуючому клітину середовищі $145 \text{ ммоль}/\text{л}$. Визначити потенціал Нернста на мембрані, що може підтримувати рівноважне відношення зазначених концентрацій при температурі 310 К . Визначити знак потенціалу.

94. Визначити час, протягом якого установиться рівноважна концентрація еритролу в клітині, якщо об'єм клітини 70 мкм^3 , коефіцієнт проникності 13 мкм/с , а площа поверхні мембрани клітини 43 мкм^2 .
95. В клітинах фагоцитів рівноважна концентрація речовини встановлюється за $0,2 \text{ с}$. Чому дорівнює проникність цієї речовини через мембрану фагоцитів, якщо вважати клітину тілом сферичної форми діаметром 8 мкм ?
96. Визначте рівноважний мембранний потенціал на мембрані при відношенні концентрацій натрію зовні та усередині клітини $10 : 1$.
97. Концентрація калію в клітинах м'язів ссавців 180 ммоль/л , у міжклітинному просторі $4,5 \text{ ммоль/л}$. Визначити розмір та знак потенціалу на мембрані при температурі 37°C .
98. Визначити рівноважний мембранний потенціал мітохондрій, якщо при 37°C усередині мітохондрій $\text{pH} = 9$, а в навколишньому середовищі $\text{pH} = 7$? Температура дорівнює 20°C .
99. Концентрація йонів Cl^- усередині клітини дорівнює 9 ммоль/л , а в оточуючому клітину середовищі 125 ммоль/л . Різниця потенціалів на мембрані дорівнює 70 мВ . Чи знаходяться йони Cl^- у рівновазі? Температуру вважати рівною 310 К .
100. Середнє значення концентрації йонів K^+ в аксоплазмі гігантського аксона кальмара дорівнює 360 моль/м^3 , а ззовні – 10 моль/м^3 . Обчислити потенціал Нернста для цих йонів при температурі 27°C . Визначити знак потенціалу.

3.3.4. Біофізика нервового імпульсу. Потенціал спокою та потенціал дії

101. Потенціал спокою нервового волокна кальмару дорівнює -60 мВ , а потенціал дії $+35 \text{ мВ}$. Внаслідок чого відбувається така зміна мембранного потенціалу?
102. Половина усіх йонів калію усередині велетенського аксону кальмару було замінено натрієм. Розрахуйте величину мембранного потенціалу спокою аксону кальмару при 25°C .

103. Обчисліть потенціал спокою велетенського аксону кальмару, якщо відомо, що концентрація йонів натрію зовні дорівнює 450 ммоль/л, а усередині нього – 50 ммоль/л (температура дорівнює 20°C).
104. Розрахуйте величину мембранних потенціалів спокою та дії для аксону кальмару, якщо концентрація K^+ усередині клітини – 400, а в позаклітинному середовищі – 10 ммоль/л, концентрація Na^+ усередині – 50, ззовні – 460 ммоль/л, а йони хлору містяться в клітині в концентрації 100 ммоль/л, поза клітиною – 560 ммоль/л.
105. Відомо, що в клітині, яка знаходиться в спокої, провідність для калію у 23 рази більша, ніж для натрію. Чому дорівнює потенціал спокою клітини, якщо $U_K = -80$ мВ, $U_{Na} = 40$ мВ?
106. При якому відношенні провідностей мембран при її деполяризації на 5 мВ виникне потенціал дії, якщо потенціал спокою дорівнює -75 мВ?
107. Розрахуйте потенціал дії аксону кальмару, якщо концентрація калію і натрію усередині клітини збудливої тканини відповідно: 125 ммоль/л та 1,5 ммоль/л, ззовні 2,5 ммоль/л та 125 ммоль/л.
108. Чому дорівнює стала довжини безм'якотного аксона, якщо питомий опір мембрани дорівнює $R_m = 5$ кОм·см², а аксоплазми – $R_a = 50$ Ом·см? Діаметр аксона $D = 30$ мкм.
109. Стала довжини немієлізованого волокна дорівнює 3 мм. На якій відстані від початку розповсюдження сигналу він зменшиться у 100 разів?
110. Омичний опір нервового волокна в стані спокою дорівнює 1000 Ом, а при збудженні знижується до 25 Ом. У скільки разів при цьому збільшується провідність мембрани?

3.4. Контрольні питання

1. Чи можливий процес на мембрані збудливої клітини, при якому одночасно назустріч протікають потоки різних йонів, що мають однаковий знак заряду? Відповідь поясніть.
2. Чому молекули води легко проникають через біліпідний шар мембран?

3. Як зміниться вид графіку потенціалу дії, якщо змінити хімічний склад усередині аксона та зовні: аксоплазму замінити на позаклітинну рідину, а позаклітинну рідину – на аксоплазму?
4. Охарактеризуйте фізичні властивості мембранних ліпідів та їх роль у будові й властивостях біологічних мембран, роль мембранних білків.
5. Опишіть види руху ліпідів і білків в мембрані (латеральна дифузія, фліп-флоп, обертальна дифузія).
6. Які види пасивного транспорту речовин через мембрану? У чому полягають правила Овертона?
7. Які речовини дифундують через канали в мембрані? Вкажіть властивості мембранних каналів.
8. У чому полягає полегшена дифузія? Які її види та властивості?
9. Що представляє собою мембранний потенціал спокою?
10. Вкажіть, як співвідносяться між собою у стані спокою проникності мембран живих клітин для йонів.
11. Які умови враховуються при визначенні мембранного рівноважного потенціалу Нернста?
12. Вкажіть величини рівноважних потенціалів Нернста для йонів Na^+ , K^+ та Cl^- за нормальних умов.
13. Які умови враховуються при визначенні рівноважного потенціалу Доннана?
14. Вкажіть, для яких випадків доннанівський потенціал ближче всього до потенціалу клітини. Які умови враховуються при визначенні дифузійного мембранного потенціалу?
15. Які умови враховуються при визначенні стаціонарного мембранного потенціалу?
16. Що таке потенціал дії?
17. Вкажіть причини утворення потенціалу дії.
18. Як співвідносяться в початковий момент збудження проникності мембран для йонів у живих клітинах?
19. Вкажіть тривалість потенціалу дії для аксону кальмара за нормальних умов.

20. Чим визначається форма початкової фази деполяризації мембрани при формуванні потенціалу дії?
21. Чим визначається фаза реполяризації мембрани при формуванні потенціалу дії?
22. Чи виникне потенціал дії, якщо з навколишнього середовища клітини видалити повністю йони натрію?
23. Які особливості поширення потенціалу дії по нервових волокнах?
24. Який сенс електрохімічного потенціалу? Що описують рівняння Теорела, Нернста-Планка, Фіка? Що таке проникність мембран?
25. Що таке активний транспорт? Поясніть механізм активного транспорту йонів на прикладі натрій-калієвого насосу.
26. Як формуються мембранні потенціали спокою клітини?
27. Виведіть формулу для рівноважного потенціалу Нернста.
28. Які йони визначають мембранні потенціали клітин? Запишіть рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца. Що воно визначає?
29. Які значення мембранних потенціалів спокою різних клітин? Яка при цьому напруженість електричного поля в мембрані?
30. Як дія подразника впливає на мембранний потенціал? За яких умов клітина може збудитися?
31. Що таке підпорогові стимули та місцеві потенціали? Які їх властивості?
32. За яких умов виникає збудження клітини? Які процеси відбуваються на мембрані при генерації потенціалу дії?
33. Охарактеризуйте фази деполяризації та реполяризації, їх тривалість і зв'язок з йонними потоками через мембрану. Яка форма і тривалість потенціалів дії різних клітин?
34. Від чого і як залежить проникність натрієвих каналів?
35. Приведіть порівняльну характеристику потенціалу дії і локального відгуку. Які істотні відмінності між ними?
36. опишіть процес поширення потенціалу дії з безмієлінового аксону.
37. Охарактеризуйте процес поширення потенціалу дії по мієліновому аксону.

4. БІОФІЗИКА СКЛАДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

В четвертому розділі розглядаються теоретичні основи та практичні завдання що передбачають розрахунок та дослідження складних біологічних організмів та їх систем [19, 27].

Для цього, в розділі пропонуються завдання, в яких проводиться математичне моделювання систем «хижак-жертва», «популяція», фармакокінетичної системи; завдання на розрахунок характеристик зорової системи, системи кровообігу та системи газообміну в організмі людини та тварин [9, 13, 30].

4.1. Основні теоретичні відомості

Математичне моделювання складних біологічних систем

Моделювання – один з основних методів біофізики. Його використовують на всіх рівнях вивчення живих систем, починаючи від молекулярної біофізики, біофізики мембран, біофізики клітини та органів і закінчуючи біофізикою складних систем.

Така модель узгоджує реальний об'єкт для дослідження.

У біофізиці, біології і медицині часто застосовують фізичні, біологічні, математичні моделі.

Поширеним є також аналогове моделювання.

У математичному моделюванні часто використовують диференціальні рівняння, наприклад, коли процеси, що вивчаються, або явища, зручно описувати плоскими функціями, коли в описі беруть участь такі поняття, як швидкість, пришвидшення.

Тут мають на увазі не швидкість якої-небудь точки або тіла, а швидкість перебігу процесу: це можуть бути процеси наповнення, поширення тощо. Звичайні диференціальні рівняння поширені в інженерній практиці, кожне з них може описувати який-небудь інженерний процес.

Розглянемо дві математичні моделі, які дозволяють знайти залежність зміни чисельності популяції від часу для різних умов функціонування системи.

Рівняння динаміки популяції в умовах обмеженого живлення (закон Ферх'юльста або логістичне рівняння):

$$\frac{dN}{dt} = k N \left(1 - \frac{N}{N_{\text{рів}}} \right), \quad (95)$$

де k – константа, $N_{\text{рів}}$ – рівноважна чисельність популяції.

Як приклад можна навести зростання дерева і розглянути його як вільну енергію, яка створює фотосинтез у зеленій частині рослин. Із плином часу крива зростання наближається до деякої величини, яка визначає граничну висоту дерева певної породи. Відкладені по вертикальній осі величини є деякими кількісними характеристиками породи дерева.

Наприклад, знаючи середнє значення висоти дерева певної породи за два вікові періоди (20 та 50 років), можна з розв'язанням згаданого диференціального рівняння знайти a і b і побудувати криву зростання.

Ця модель добре узгоджується з експериментальними даними

Рівняння динаміки популяції з урахуванням постійного відтоку:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N^2 - \beta N - V_0 = f(N), \quad (96)$$

де α , β - відповідно, коефіцієнти приросту та загибелі популяції; V_0 – початковий обсяг популяції.

Дана модель адекватна реальності лише до певних значень часу. Згідно з цією моделлю, за якою розглядається зменшення чисельності особин тільки за рахунок природної загибелі, їх чисельність має нескінченно збільшуватися з плином часу, що не відповідає реальності.

Нехай в деякому просторі живуть два види особин: зайці (жертви) та рисі (хижаки).

Зайці харчуються рослинною їжею, що є завжди в достатній кількості (між ними немає внутрішньовидової боротьби).

Рисі можуть харчуватися тільки зайцями.

Таким чином, чисельність популяцій x і y зазнають гармонічних коливань відносно стаціонарних значень з однаковою частістю, але зсунуті за фазою.

Синусоїдне розв'язання можливе лише за малих відхилень від стаціонарних значень.

У разі великих відхилень закон не буде гармонізованим. Проте така модель цілком адекватна дійсності: зі збільшенням численності хижаків відбувається зменшення їх жертв і навпаки з однаковою частотою ці явища спостерігаються зі зсувом за фазою.

Модель «хижак-жертва»:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon \cdot x - \alpha \cdot x \cdot y \\ \frac{dy}{dt} = \delta \cdot x \cdot y - \beta \cdot y \end{cases}, \quad (97)$$

де x - число жертв у момент часу t ; y - число хижаків у момент часу t ,

$\frac{dx}{dt} = \gamma x$, $\frac{dy}{dt} = \delta x y$ – відповідно, швидкості розмноження жертв та хижаків;

σx , βy – відповідно, швидкості природної загибелі жертв та хижаків;

$\alpha \cdot x \cdot y$ – швидкість загибелі жертви за рахунок її зустрічі з хижаком.

Модель «хижак–жертва» використовують у медицині.

Так, під час моделювання онкологічних захворювань пухлинні клітини розглядають як жертви, а лімфоцити, які можуть їх пригнічувати, – як хижаки.

У цьому випадку моделювання дозволяє здобути нові знання про процеси міжклітинної взаємодії у разі патології, знаходити оптимальну стратегію лікування, створювати нові засоби боротьби з ними.

Для опису кінетики зміни концентрації введеного в організм лікарського препарату пропонується так звана фармакокінетична модель, рис.6.

Фармакологічна модель (концентрація лікарського препарату в організмі)

- однократне введення лікарського препарату (ін'єкція):

$$c = \frac{m}{V}, \quad c = c_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad [\text{кг/м}^3; \text{кг/моль}]; \quad (98)$$

- безперервне введення препарату з постійною швидкістю (інфузія):

$$c = \frac{Q}{k \cdot V} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad [\text{кг/м}^3; \text{кг/моль}]; \quad (99)$$

- поєднання безперервного введення препарату з введенням дози навантаження:

$$c = \frac{Q}{k \cdot V} - \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{Q}{k} - m_0 \right) \cdot e^{-k \cdot t} \text{ [кг/м}^3\text{; кг/моль]}, \quad (100)$$

де m – маса речовини, що вводиться [кг]; Q, P – відповідно, швидкості введення та видалення лікарської речовини в організм за одиницю часу [кг/с], V – об'єм крові [м³], c_0 – початкова концентрація ліків в крові [кг/м³; кг/моль], $\frac{dm}{dt}$ – зміна маси лікарського препарату в організмі з часом [кг/с].

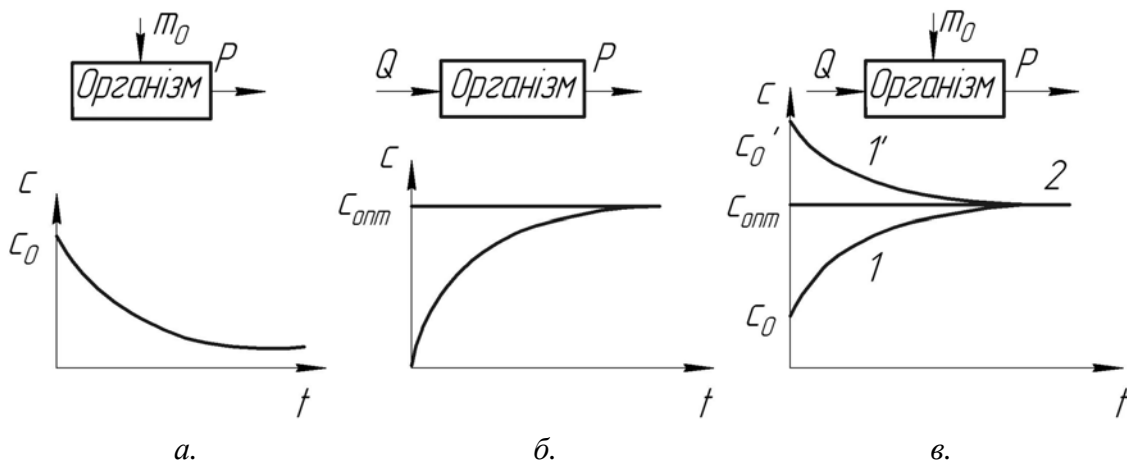


Рис.6. Фармакокінетичні моделі для різних способів введення лікарського препарату: однократне (а), безперервне (б) і комбіноване (в) та графіки, які відповідають часовій залежності концентрації лікарського препарату в організмі

Константа елімінації:

$$k_{el} = \frac{\ln\left(\frac{c_0}{c}\right)}{t} \text{ [год}^{-1}\text{]}. \quad (101)$$

Час напіввиведення препарату:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{el}} \text{ [год]}. \quad (102)$$

Таким чином, фармакокінетична модель дозволяє знайти закон зміни концентрації препарату в часі за різних способів його введення в організм, розрахувати оптимальне співвідношення між параметрами введення і виведення препарату для забезпечення необхідного терапевтичного ефекту.

Біологічні сенсори. Отримання та передача інформації

Основною причиною різкого збільшення зацікавленості та досліджень в галузі біосенсорів в останні два десятиліття є їхнє різноманіття та чутливість, що досягається завдяки використанню біологічних молекул та систем.

Біосенсор – це аналітичний прилад, що містить в своєму складі біологічний чутливий елемент (фермент, антитіло, ДНК, клітинні органели, клітини, шматочки тканин) поєднаний з перетворювачем (електрохімічним, оптичним, калориметричним або акустичним).

Вимірювання концентрації речовини аналізатор виконує кількісним перетворенням параметрів реакції (електричного опору, температури, амплітуди коливання чутливого елемента тощо) в електричний або оптичний сигнал.

Найбільш важливими властивостями будь-якого біосенсору є:

- а) його принцип дії;
- б) чутливість аналізатора відносно мішені.

Специфічність біосенсора цілком керується властивостями біологічного компонента, тому що саме тут речовина контактує з сенсором.

Чутливість приладу залежить як від біологічного компонента так і від перетворювача і визначається характером взаємодії між біомолекулою чутливого перетворювача та речовиною, яка аналізується, а також висока ефективність подальшого визначення реакції перетворювачем, рис.7.

Аналітичний рівень, моль/л		
M	100	ферментні електроди
mM	10 ⁻³	прямі імуносенсиори
μM	10 ⁻⁶	непрямі імуносенсиори
nM	10 ⁻⁹	— // —
pM	10 ⁻¹²	— // —
fM	10 ⁻¹⁵	імуноаналіз
aM	10 ⁻¹⁸	— // —

Рис.7. Типовий ряд концентрацій, виміряний різними типами біосенсорів та імуноаналізом

Порівняно з хімічними сенсорами набагато вигіднішими є біологічні сенсори, висока чутливість яких є результатом оптимального молекулярного розпізнавання.

Це найкраще можна показати на прикладі взаємодії «антиген – антитіло», де антитіло може розпізнати та приєднати відповідний антиген з надзвичайно високою чутливістю.

Найменші хімічні зміни в молекулярній структурі антигену можуть зменшити спорідненість до антитіла (яке мало перехідну реакційність).

Наприклад, ферменти, як глюкозооксидаза, будуть розпізнавати свій природній субстрат (глюкозу в даному випадку) з набагато більшою спорідненістю, ніж інший компонент у реакційному середовищі.

Хімічно подібні молекули (наприклад, цукри) можуть проявляти деяку активність, якщо присутні в достатньо високій концентрації.

Рівень специфічності, та в багатьох випадках чутливості, розпізнавання та вимірювання, що був досягнутий в біосенсорах, набагато перевищує той, що існує в переважній більшості хімічних сенсорів.

Висока специфічність біомолекул та біологічних систем, що стосується міжмолекулярних взаємодій, може бути використана в біосенсорних приладах лише при наявності високоефективного сполучення між біологічним компонентом і компонентом перетворювача.

Ряд потенційних біологічних компонентів і подібний ряд перетворювачів можна використати в біосенсорах (табл.1), що робить необхідним мульти- та міждисциплінарний підхід у розробці та дослідженнях в цій області.

В області перетворювачів зроблено досить багато, але вони вимагають подальшого розвитку та оптимізації.

На практиці ряд оптичних та електрохімічних технологій при створенні біосенсорів використано в поєднанні з біологічним аналізом.

Проте, з розвитком цифрової (особливо комп'ютерної) техніки, виникло питання не лише швидкого та точного перетворення отримуваних такими сенсорами даних, але й інтерпретування їх технічними засобами.

Таблиця 1 – Основні компоненти біосенсорів

Біологічний компонент	Перетворювачі	Біологічний компонент	Перетворювачі
Нуклеїнові кислоти	Оптичні	Мембрани	Кондуктометричні
Коферменти	Флуоресцентні	Органели	П'єзоелектричні
Антитіла	Поглинаючі	Клітини	Калориметричні
Рецептори	Електрохімічні	Тканини	Акустичні
Ферменти	Амперометричні	Організми	Механічні
Ферментні системи	Потенціометричні		

Так, в 1946 році американський вчений-статистик Джон Тьюкі запропонував назву БІТ (BIT – аббревіатура від BInary digiT) для позначення одного двійкового розряду, здатного приймати значення 0 або 1.

Шеннон використав біт як одиницю виміру інформації, а мірою кількості інформації запропонував вважати функцію, названу ним **ентропією**.

Він зауважив, що при передачі різних символів ми передаємо різну кількість інформації. Якщо ми передаємо символи, що часто зустрічаються, то інформації менше; при передачі мало вживаних символів – більше.

Це видно при кодуванні букв алфавіту азбукою Морзе.

Найчастіші літери передаються коротко, а для мало вживаних використовують більш довгі ланцюжки.

Наприклад, повідомлення подано кирилицею.

Так, символ «Е» кодується однією точкою «.», а рідкісний символ «Ш» - чотирма тире «----» (це найдовша послідовність на букву в азбуці Морзе).

Кількість інформації на букву пов'язано з частотою вживань цієї букви у всіх повідомленнях, які формуються на мові. Чим більше рідкісну букву ми передаємо, тим більше в ній інформації.

В теорії інформації *ентропія* – це міра невизначеності випадкової величини.

В якості інформаційної ентропії використовують ентропію Шеннона, яка визначає абсолютну межу найкращого стиснення даних без втрат: розглядаючи повідомлення як послідовність незалежних та однаково розподілених

випадкових величин, теорема Шеннона про кодування доводить, що середня довжина найкоротшого можливого представлення закодованого повідомлення в заданому алфавіті дорівнює ентропії поділеній на логарифм кількості символів у вихідному алфавіті.

Кількість інформації:

$$I = \lg_2 N \text{ [біт]}, \quad (103)$$

де N – кількість станів джерела інформації або кількість можливих символів, які передаються каналом: $N = 2^n$, тоді $I = \lg_2 2^n$, де n – біт інформації.

Величина трансформації інформації:

$$T = H(X) + H(Y) - H(X, Y), \quad (104)$$

де $H(X)$, $H(Y)$ – кількість інформації (ентропія) джерела і приймача відповідно; $H(X, Y)$ – кількість інформації (ентропія) зв'язку.

Потужність інформаційного каналу (ємність каналу):

$$c = \frac{T}{\tau} \text{ [біт/с]}, \quad (105)$$

де τ – середня тривалість передачі одного інформаційного символу.

Коефіцієнт екстинкції – показник швидкості затухання світлової хвилі в середовищі.

У біофізиці коефіцієнт екстинкції визначається, як характеристика поглинання світла в залежності від концентрації певної речовини у розчині.

Оптична густина розчину:

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_i = \sum_i D_i = \sum_i \varepsilon_i \cdot C_i \cdot L \text{ [моль/м}^2\text{]}, \quad (106)$$

де C_i – концентрація i -ої речовини в розчині [моль/м³]; L - товщина середовища, через яке проходить світло [м]; ε_i – коефіцієнт екстинкції даної речовини.

Оптична густина – термін який використовується в оптиці, в двох різних значеннях: перше значення пов'язане з показником заломлення середовища.

Середовище з більшим значенням показника заломлення називають оптично густішим. У протилежному випадку використовують термін менш оптично густе середовище. Інше значення терміну оптична густина пов'язане з поглинанням світла в оптичному елементі.

Зв'язок коефіцієнта молярної екстинкції з ефективною площею S

молекули, яка поглинає кванти світла:

$$\varepsilon = \frac{N a \lg e}{1000} S = 2,62 \cdot 10^{20} S. \quad (107)$$

Флуоресценція або флюоресценція – короткотривала (від пікосекунд до мілісекунд) люмінесценція.

Виникає внаслідок: опромінення речовини світлом, йонізуючим промінням, проходження крізь неї електричного струму, при хімічних реакціях, механічному впливі тощо.

За механізмом розрізняють такі різновиди флуоресценції: резонансну, спонтанну, вимушену та рекомбінаційну.

За типом збудження розрізняють фотолюмінесценцію, рентгенолюмінесценцію, катодолюмінесценцію, хемолюмінесценцію, кріолюмінесценцію, електролюмінесценцію, триболюмінесценцію та ін. Фізичні основи флуоресценції ґрунтуються на таких термінах та визначеннях.

Діаграма Яблонського – описує перетворення системи під час флуоресценції (умовне зображення електронних та коливальних рівнів у молекулі разом із випромінювальними та невипромінювальними переходами між цими рівнями), рис.8.

Хвилястими лініями показано невипромінювальні процеси.

Невипромінювальний перехід між станами з однаковою мультиплетністю називається внутрішньою конверсією (ic); а між станами з різною мультиплетністю – інтеркомбінаційною конверсією (isc).

Інтеркомбінаційна конверсія відбувається ізоенергетично, тобто відповідні стрілки на рисунку мали б бути горизонтальними; їхній діагональний напрямок обумовлений лише зручністю зображення.

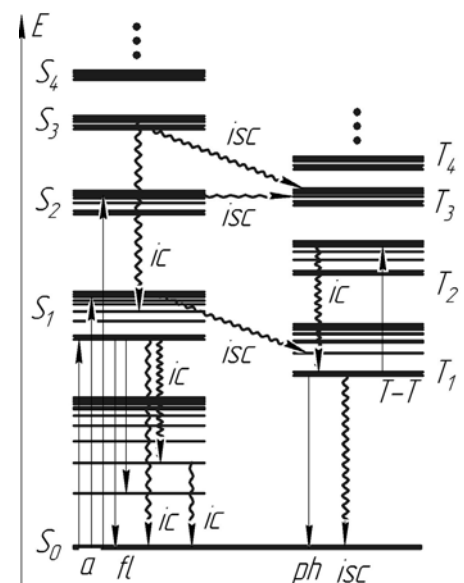


Рис.8. Один з можливих варіантів діаграми Яблонського [31].

Зрештою, подальша внутрішня конверсія може відбуватися так швидко, що цей процес дійсно може розглядатися як єдиний і неізоенергетичний («діагональний»).

Квантовий вихід флуоресценції – ефективність перетворення збудження на випромінювання зазвичай залежить від часу життя збудженого стану:

$$\varphi = \frac{n_{\phi}}{n_a}, \quad (108)$$

де n_a та n_{ϕ} – кількість квантів, які поглинаються і випромінюються, відповідно.

Гарні флуорофори (наприклад, родамін) мають квантовий вихід, близький до одиниці (100 %).

В лабораторній практиці вимірюють квантовий вихід відносно стандарту.

Для цього вимірюють в однакових умовах флуоресценцію та поглинання досліджуваної речовини та стандарту, а обчислення проводять за формулою:

$$\varphi = \varphi_s \frac{I}{A} \cdot \frac{A_s}{I_s}, \quad (109)$$

де I – інтегральна інтенсивність флуоресценції досліджуваної речовини в усьому спектральному діапазоні, A – поглинання (абсорбція) світла на довжині хвилі збудження. I_s та A_s – те ж саме, тільки для стандарту. φ_s – квантовий вихід стандарту.

Необхідні умови застосовності формули: поглинається не надто велика частка світла ($A, A_s < 0,1$), спектри випромінювання (емісії) досліджуваної речовини та стандарту близькі за діапазоном (відхилення до 50 нм).

Типовими стандартами є: хінін-сульфат, ароматичні вуглеводні, лужний розчин флуоресцеїну, родамін.

Різниця між довжиною хвилі поглинутого та випроміненого фотонів коливається в межах 20-100 нм для більшості органічних флуорофорів.

При флуоресценції емісія фотона (рис.8) відбувається завдяки переходу $S_1 \rightarrow S_0$.

Такий процес проходить за час порядку наносекунд – пікосекунд ($10^{-9} \dots 10^{-12}$ с).

Час життя збудженого стану пов'язаний із квантовим виходом: не випромінювальна деактивація флуорофора зменшує квантовий вихід пропорційно зменшенню часу життя збудженого стану:

$$\phi = \frac{k_f}{k_f + k_n}, \quad (110)$$

де k_f – швидкість випромінювального переходу; k_n – сумарна швидкість не випромінювальних переходів.

Вимірювання часу життя збудженого стану використовується для виділення різних популяцій флуорофорів, що різняться по оточенню.

Також на її основі розроблено мікроскопічні методи дослідження (FLIM).

Ферстерівський перенос енергії – процес переносу енергії збудження між двома хромофорами у ближньому полі за рахунок диполь-дипольної взаємодії. Цей принцип часто використовується в біохімії та у цьому випадку зазвичай називається «флуоресцентним резонансним переносом енергії».

Ефективність перенесення енергії збудження (механізм Фьорстера):

$$E = \frac{k_{\delta}}{k_{\delta} + k_{\bar{a}} + k_{\bar{a}}^{\bar{a}}} = 1 - \frac{\phi_{\bar{a}} + A}{\phi_{\bar{a}}}, \quad (111)$$

де k_{δ} , $k_{\bar{a}}$, $k_{\bar{a}}^{\bar{a}}$ – константи швидкості переносу енергії від донора до акцептора, флуоресценції донора і внутрішньої конверсії донора.

Хромофор-донор, що отримує енергію збудження, здатний передавати її хромофору-акцептору, розташованому в безпосередній близькості від нього (зазвичай < 10 нм), через безвипромінюваний процес диполь-дипольної взаємодії.

Цей процес переносу енергії аналогічний іншим хвильовим процесам, що відбуваються у близькому полі, через те, що відстань між хромофорами набагато менша від довжини хвилі світла, таким чином енергія передається за рахунок утворення віртуального фотона, який, проте, є лише формальним об'єктом, що не може прямо спостерігатися.

Залежність ефективності від відстані між донором і акцептором:

$$E = \frac{R_0^6}{R_0^6 + R^6}, \quad (112)$$

де R_0 – радіус Фьорстера, $R_0 = 979 (k^2 n^{-4} \varphi_d J)^{1/6}$ [нм], k^2 – фактор, який описує орієнтацію в просторі дипольних моментів переходів донора й акцептора; n – показник заломлення; J – інтеграл перекривання, який відображає ступінь перекривання спектра флуоресценції донора і спектра поглинання акцептора.

Затухання флуоресценції:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (113)$$

де I – зміна інтенсивності флуоресценції з часом t ; τ – тривалість флуоресценції речовини [с].

Інколи інтенсивність флуоресценції суттєво зменшується за наявності певних сполук у розчині.

Таке явище називається гасінням флуоресценції, а сполуки що його викликають – гасниками.

Гасіння флуоресценції речовини (формула Штерна-Фольмера):

$$\frac{I_0}{I} = 1 + k\tau c = 1 + K_{\sigma} c, \quad (114)$$

де I_0 та I – інтенсивності флуоресценції речовини відповідно за відсутності та при наявності гасіння флуоресценції концентрацією c ; k – бімолекулярна константа гасіння; K_{σ} – константа Штерна-Фольмера; τ – час існування флуоресценції [с].

Гасіння буває статичним і динамічним. При статичному гасінні флуорофор у основному електронному стані утворює нефлуоресцентний комплекс із гасником.

При динамічному гасінні утворюється звичайний збуджений стан, який руйнується гасником ще до того, як встигає відбутись флуоресцентна емісія.

Експерименти з гасінням флуоресценції триптофану акриламідом часто використовуються для аналізу конформації білкових молекул.

Окрім того гасіння органічних флуорофорів використовується при розробці флуоресцентних зондів.

Ступінь поляризації і анізотропія флуоресценції:

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad A = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + 2I_{\perp}}, \quad (115)$$

де I_{\parallel} і I_{\perp} - інтенсивності флуоресценції у випадку паралельних і перпендикулярних площин поляризації відповідно поляризатора і аналізатора.

Зв'язок ступіня поляризації P та мікрів'язкості мембрани η при флуоресценції може бути знайдений за формулою Перрена і Яблонського:

$$\frac{1}{P} - \frac{1}{3} = \left(\frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} \right) \left(1 + \frac{RT\tau}{V_{\mu}\eta} \right), \quad (116)$$

де P_0 – граничний ступінь поляризації світла на нерухомих молекулах; $R = 8,31$ [Дж/К·моль] – універсальна газова стала, T – термодинамічна температура [К], τ – час життя (час знаходження у збудженому стані) флуоресценції хромофора [с], V_{μ} – молярний об'єм флюоресцюючих молекул.

Квантовий вихід фотохімічної реакції (фотохімічна ефективність):

$$\hat{O} = \frac{[P]}{n_a}, \quad (117)$$

де $[P]$ – кількість утворених молекул під дією n_a абсорбованих квантів:

$$\hat{O} = \frac{n_p}{n_e}, \quad (117')$$

де n_p – кількість молів утвореного продукту; n_e – кількість поглинених ейнштейнів світла.

Основні закони гемодинаміки

Гемодинаміка – галузь фізіології, яка вивчає закономірності руху крові кровоносними судинами.

Відповідно до законів гідродинаміки, кількість рідини (Q), яка протікає через будь-яку трубу прямо пропорційна різниці тиску в початку (p_1) і в кінці (p_2) труби і навпаки, обернено пропорційно опору (W) руху рідини:

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{W} \text{ [м}^3\text{]}. \quad (118)$$

Якщо застосувати це рівняння до кровоносної системи, то слід взяти до уваги, що тиск в кінці цієї системи, тобто у місці впадання порожнистих вен у серце, близький до нуля.

В цьому випадку рівняння можна записати так:

$$Q = \frac{P}{W} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (119)$$

де Q – кількість крові, що виганяється серцем за хвилину [м^3]; p – величина кров'яного тиску в аорті [Па]; W – величина судинного опору [$\text{Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$].

Периферійний опір судинної системи складається з множини окремих опорів кожної окремої судини.

Будь-яку з таких судин можна вважати подібною трубці, опір якої визначається за формулою Пуазейля (гідрравлічний опір судини):

$$W = \frac{8\eta \cdot l}{\pi R^4} \text{ [Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3\text{]}, \quad (120)$$

де η - в'язкість рідини яка по ній протікає [$\text{Па}\cdot\text{с}$]; l – довжина трубки [м]; R – радіус трубки [м].

Об'єм рідини, що переноситься за 1 с:

- через переріз циліндричної труби радіусом R (формула Гагена-Пуазейля):

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{l} \text{ [м}^3\text{)];} \quad (121)$$

- через змінний переріз:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{dp}{dl} \text{ [м}^3\text{)],} \quad (121')$$

де ΔP - падіння тиску [Па], тобто різниця тиску біля входу в трубу P_1 та на виході з неї P_2 на відстані l , де l - довжина ділянки труби [м], на кінцях якого підтримується різниця тиску $(p_1 - p_2)$ [Па].

Сила внутрішнього тертя, що діє на тіло (кульку), що рухається в рідині, радіусом r (закон Стокса):

$$F_{\delta\delta} = 6\pi\eta r v \text{ [Н]}, \quad (122)$$

де v – швидкість кульки [м/с].

Найбільший опір має мати капіляр, діаметр якого близько 5-7 мкм.

Але оскільки велика кількість капілярів включена в судинну мережу паралельно, її сумарний опір менший ніж сумарний опір артеріол.

Хвилинний об'єм серця, серцевий викид:

$$V_y \cdot N_{cc} = V_t, \quad (123)$$

де V_y – ударний об'єм [л], N_{cc} – число серцевих скорочень за 1 хв, V_t – хвилинний об'єм кровообігу [л].

Сердечний індекс (індекс Грольмана):

$$i_c = V_t / S \text{ [л/м}^2\text{]}, \quad (124)$$

де S – поверхня тіла [м²].

Точно визначити опір за цими формулами неможливо, оскільки всі формули дійсні тільки для ламінарної течії ньютонівських рідин.

Однак геометрія судин змінюється внаслідок скорочення їх стінок завдяки пульсу та біля стенозів, а також потік крові є турбулентним щонайменше в кількох місцях (аорта, серце).

В'язкість крові також не є постійною величиною (зростає зі зменшенням швидкості і для дуже малих швидкостей є аномально високою), тобто кров – це неньютонівська рідина і тому всі ці рівняння дійсні для неї досить наближено.

Сила, що виникає в міокарді при його скороченні, залежить від початкової довжини міокардних волокон, оскільки, у міру скорочення, волокно збільшує число міозинових містків, які беруть участь в скороченні.

Це є загальною властивістю м'язової тканини.

При цьому, початкова довжина міокарду залежить від міри розтягування їх кров'ю, що поступає з передсердя.

Отже, сила скорочення міокарду шлуночків тим значніша, чим більше крові поступає в них під час діастолі.

Від наповнення діастолі шлуночків залежить основний показник скорочувальної функції серця – систолічний (ударний) об'єм - V_c - це, так званий об'єм крові, який викидається кожним шлуночком при одному скороченні.

Систалічні об'єми (V_c) лівого та правого шлуночків однакові. Для кожного зі шлуночків V_c складає приблизно 70-100 мл в умовах спокою.

При цьому виганяється приблизно 60-70% крові, що міститься в шлуночках в період діастолі.

При фізичній роботі і емоціях V_c збільшується у 2-3 рази.

Від V_c залежить робота серця, але її величина може бути різною при одному і тому ж значенні V_c .

Об'ємна швидкість викиду крові лівим шлуночком в початковий відрізок аорти в 1 с:

$$v_V = V_c / t \text{ [см}^3\text{/с]}, \quad (125)$$

де V_c – об'єм систолі, см^3 ; t – час вигнання, с.

Лінійна швидкість кровотоку:

$$v_k = v_V / Q \text{ [см/с]}, \quad (126)$$

де v_V – об'ємна швидкість викиду крові лівим шлуночком в аорту [$\text{см}^3\text{/с}$];

Q – площа поперечного перерізу аорти [см^2].

Робота, що здійснюється серцем, витрачається, по-перше, на виштовхування крові в магістральні артеріальні посудини проти сил тиску і, по-друге, на надання крові кінетичній енергії.

Перший компонент роботи називається статичним (потенційним); другий компонент – кінетичним.

Загальна робота, що здійснюється серцем при кожному скороченні:

$$A = 1,2 \cdot V \left(p + \frac{\rho v^2}{2} \right) \text{ [Дж]}, \quad (127)$$

де p – середній тиск, під яким кров викидається в аорту [Па], ρ – густина крові в аорті [кг/м^3], V – ударний об'єм [м^3].

Витрата енергії на підтримку руху 1 л крові протягом 1 хв:

$$E = P t / V_t \text{ [Вт]}, \quad (128)$$

де P – потужність скорочень лівого шлуночка [Вт]; t – сумарний час вигнання [с]; V_t – хвилинний об'єм серця [л].

Потужність скорочень лівого шлуночка:

$$P = v_v \cdot p_c \cdot 13,6 \cdot 9,8 \cdot 10^6 \text{ [Вт]}, \quad (129)$$

де v_v – об'ємна швидкість викиду крові [$\text{см}^3/\text{с}$]; p_c – середній динамічний тиск [Па]; 13,6 – питома вага ртуті – множник для переведення тиску в міліметри водяного стовпа; $9,8 \cdot 10^6$ – множник для вираження потужності у ватах.

Потужність серця теплокровної тварини:

$$N = Q p v, \text{ [Вт]}, \quad (130)$$

де Q – загальний об'єм крові, який приймає участь в кровооберті [л]; p – перепад тиску в кровоносній системі [Па]; v – середня швидкість руху крові [м/с].

Особливе значення в гемодинаміці має залежність динамічної в'язкості крові від її складу, яка визначається гематокритом

Гематокрит – відношення об'єму формених елементів крові (еритроцити, лейкоцити, тромбоцити) до загального об'єму крові:

$$Ht = \frac{V_\phi}{V_{r\ddot{e}}} \text{ [л/л]}, \quad (131)$$

де V_ϕ - об'єм формених елементів крові (тромбоцитів, фагоцитів, еритроцитів тощо) [л]; $V_{r\ddot{e}}$ - об'єм плазми крові [л].

Гематокрит (Ht) виражають у відсотках до загального об'єму крові, або в літрах на літр (л/л), що відповідає частці формених елементів в 1 літрі крові (450 мл клітин в 1 літрі крові = 0,45 л/л = 45%).

У нормі гематокрит дорослого чоловіка дорівнює 0,41...0,53, а дорослої жінки - 0,36...0,46.

У новонароджених гематокрит приблизно на 20% вищий, а у маленьких дітей – приблизно на 10% нижчий, ніж у дорослого.

Емпірична формула, що зв'язує коефіцієнт в'язкості крові з показником гематокриту:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + \alpha \cdot Ht)^{\beta} \text{ [Па}\cdot\text{с]}, \quad (132)$$

де η_0 - в'язкість плазми крові [Па·с].

Одним з важливих гемодинамічних процесів є поширення пульсової хвилі.

Пульсова хвиля – процес поширення зміни об'єму вздовж еластичної судини в результаті одночасної зміни в ньому тиску і маси рідини.

Загасання амплітуди пульсової хвилі при її розповсюдженні уздовж судин:

$$P_0(x) = P_{0,\max} \cdot e^{-\beta \cdot x}, \quad (133)$$

де β - коефіцієнт загасання, x – шлях, що пройшла пульсова хвиля [м].

Швидкість поширення пульсової хвилі залежить від властивостей судини та крові:

$$v_n = \frac{l}{t}, \quad v_i = \sqrt{\frac{E \cdot h}{2r \cdot \rho}} \quad [\text{м/с}], \quad (134)$$

де l – шлях, пройдений пульсовою хвилею (відстань між приймачами пульсу) [м], t – час запізнювання пульсу [с], E – модуль Юнга матеріалу стінки судини [Па], h – її товщина [м], r – радіус просвіту [м], ρ - густина крові [кг/м³].

Швидкість поширення пульсової хвилі з урахуванням віку людини:

- (формула Бабіна):

$$v_n = 0,1 \cdot B^2 + 4 \cdot B + 380 \quad [\text{м/с}]; \quad (134')$$

- (формула Карпмана):

$$v_n = 8 \cdot B + 425 \quad [\text{м/с}], \quad (134'')$$

де у цих рівняннях є одна змінна B – вік, коефіцієнти є емпіричними постійними.

Газообмін у легенях і тканинах. Робота дихання

Спірометрія – метод дослідження функції зовнішнього дихання, що включає вимірювання об'ємних і швидкісних показників дихання.

Під час цього дослідження виконуються такі види спірометричних проб:

- спокійне дихання,
- форсований видих,
- максимальна вентиляція легенів,
- функціональні проби (з бронходилататорами, провокаційні тощо).

Спірометрію використовують для діагностики такого захворювання, як бронхіальна астма, а також для оцінювання стану апарата дихання у разі інших захворювань і під час різних медичних заходів. Так, зміна газового складу повітря в легенях людини під час різних етапів дихання наведена в табл.2.

Таблиця 2. Газовий склад в легенях людини під час різних етапів дихання

Тип повітря	Кисень, O ₂ , %	Вуглекислий газ, CO ₂ , %	Азот, N ₂ , %	Домішки
Вдихуване	21	0,03	79	Водяна пара, інертні гази
Видихуване	16	4	79	Збільшений вміст водяної пари
Альвеолярне	14	5	80	

Основні показники, що оцінюються під час проведення спірометрії:

Життєва ємність легень (формула Болдуїна; оцінюється як різниця об'ємів повітря в легенях під час повного вдиху, так і повного видиху):

- для чоловіків:

$$V_{жс}^ч = (27,63 - (0,112 \cdot R) \cdot H) \text{ [л];} \quad (135')$$

- для жінок:

$$V_{жс}^ч = (21,78 - (0,101 \cdot R) \cdot H) \text{ [л],} \quad (135'')$$

де H – зріст [см], R – вік [роки].

Об'єм повітря в «мертвому» просторі (частина простору дихальних шляхів, заповнена повітрям, що не бере участь у газообміні):

$$V = \frac{F_a - F_g}{F_a - F_e} \cdot V_t \text{ [л],} \quad (136)$$

де F_a , F_e , F_g – відповідно концентрація CO₂ в альвеолярному, вдихуваному і видихуваному повітрі; V_t – об'єм дихання [м³].

Ефективність дихання людини:

$$\varepsilon = \frac{V_t - V}{V_t} \cdot 100\%. \quad (137)$$

Об'єм альвеолярної вентиляції:

$$V_{ab} = f \cdot (V_t - V_d) \text{ [м}^3\text{]}, \quad (138)$$

де f – частота дихання, V_t – об'єм дихання [м³], V_d – альвеолярний мертвий простір [м³]

Об'єм дихання за одну хвилину (об'єм форсованого видиху за першу хвилину маневру форсованого видиху):

$$V_a = V_o - (f \cdot V_d) \text{ [м}^3\text{]}, \quad (139)$$

де V_d – альвеолярний мертвий простір [м³], V_o – загальна легенева вентиляція [м³].

Дихальний коефіцієнт:

$$ДК = V_{CO_2} / V_{O_2}, \quad (140)$$

де V_{CO_2} , V_{O_2} – відповідно, кількість виділеного при видиху вуглекислого газу та поглиненого при вдиху кисню [л].

Резерв дихання:

$$РД = V_e / V_a, \quad (141)$$

де V_e – максимальна вентиляція легенів [л] – найбільша кількість повітря, яку можна провентилювати за 1 хв; V_a – хвилинний об'єм дихання [м³].

Максимальна вентиляція легенів:

- для чоловіків:

$$V_{e,max}^ч = (86,5 - 0,522 \cdot R) \cdot S \text{ [л]}, \quad (142')$$

- для жінок:

$$V_{e,max}^{ж} = (71,3 - 0,474 \cdot R) \cdot S \text{ [л]}, \quad (142'')$$

де S – площа поверхні тіла [м²], R – вік [роки].

Робота дихання (показник, за допомогою якого оцінюють роботу дихальних м'язів):

$$W = P \cdot V \text{ [Дж]}, \quad (143)$$

де P – тиск в легенях [Па], V – об'єм легень [м³].

4.2. Приклади розв'язання типових завдань

Приклад 18. Первинна концентрація в крові деякого препарату дорівнювала $c_0 = 50$ мкг/мл, а через $t = 10$ год зменшилася до $c = 20$ мкг/мл.

Розрахуйте константу елімінації цього препарату та час його напіввиведення $t_{1/2}$.

Процес елімінації описується однокамерною моделлю.

Дано: $c_0 = 50$ мкг/мл $= 5 \cdot 10^{-2}$ кг/л; $c = 20$ мкг/мл $= 2 \cdot 10^{-2}$ кг/л; $t = 10$ год.

Знайти: k_{el} , $t_{1/2}$

Розв'язок:

Константу елімінації (за формулою 101) обчислюємо з лінеаризованого рівняння для концентрації:

$$k_{el} = \frac{\ln\left(\frac{c_0}{c}\right)}{t} = \frac{\ln\left(\frac{50}{20}\right)}{10} = 0,092 \text{ год}^{-1}.$$

Час напіввиведення препарату (за формулою 102): $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{el}} = \frac{0,693}{0,092} = 7,5$ год.

Приклад 19. Популяція бактерій росте в умовах обмеженого живлення. Рівноважна щільність популяції складає $5 \cdot 10^8$ клітин на 1 мл. При малій щільності популяція подвоюється за 40 хв. Якою буде щільність популяції через 2 години, якщо початкова щільність дорівнює: а) 10^8 клітин на 1 мл; б) 10^9 клітин на 1 мл?

Дано: $N_{piv} = 5 \cdot 10^8$ клітин/мл $= 5 \cdot 10^{11}$ клітин/л; $N_{01} = 10^8$ клітин/мл $= 10^{11}$ клітин/л; $N_{02} = 10^9$ клітин/мл $= 10^{12}$ клітин/л; $t = 40$ хв, $T = 2$ год $= 120$ хв.

Знайти: k_{el} , $t_{1/2}$

Розв'язок:

Запишемо рівняння динаміки популяції в умовах обмеженого живлення (відоме як закон Ферх'юльста (за формулою 95) або логістичне рівняння):

$$\frac{dN}{dt} = k N \left(1 - \frac{N}{N_{\partial\partial a}} \right).$$

Тут k – константа, N_{piv} – рівноважна чисельність популяції. Для розв'язання задачі необхідно проінтегрувати це рівняння методом розподілу змінних.

Розв'язок має вигляд:

$$N(t) = \frac{N_0 \exp(kt)}{1 + \frac{N_0}{N_{\partial\partial a}} (\exp(kt) - 1)}.$$

При $t = 0$ чисельність дорівнює початковому значенню N_0 , тоді як при $t \rightarrow \infty$, $N(t) \rightarrow N_{piv}$.

Для знаходження k скористаємося додатковою умовою завдання. Так, при малій щільності зміна популяції визначається лінійним законом $\Delta N / N = k \Delta t$. У разі подвоєння маємо $\Delta N = N$, отже $k = 1/T$, де T – час між послідовними діленнями.

Таким чином, остаточно отримуємо:

$$N(t) = \frac{N_0 \exp\left(\frac{t}{T}\right)}{1 + \frac{N_0}{N_{\text{ста}}}\left(\exp\left(\frac{t}{T}\right) - 1\right)}$$

Підставимо конкретні значення. У випадку а) отримуємо $N(2) = 4,17 \cdot 10^8$ клітин на 1 мл; у випадку б) $N(2) = 5,13 \cdot 10^8$ клітин на 1 мл.

Приклад 20. Популяція кроликів розмножується з швидкістю, квадратичній їх чисельності, і гине за лінійним законом. Чи буде знищена популяція, якщо зграя вовків знищує кроликів з постійною швидкістю?

Дано: α, β, V_0

Знайти: N / N_I

Розв'язок:

Запишемо рівняння динаміки популяції з урахуванням постійного відтоку (96):

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N^2 - \beta N - V_0 = f(N).$$

Стаціонарні точки визначаються з рівності нулю правої частини рівняння.

Розв'язок має вигляд:
$$N_{1,2} = \frac{\beta}{2\alpha} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4\alpha V_0}{\beta^2}} \right).$$

Отже, є одна стаціонарна точка (від'ємний корінь рівняння не має сенсу). Неважко переконатися, що стаціонарна точка нестійка. Таким чином, при $N > N_I$ продовжиться необмежене зростання популяції, а при $N < N_I$ популяція загине.

Приклад 21. Розрахуйте роздільну здатність людського ока на відстані $L = 10$ м від даного предмета. Середня відстань між колбочками складає $h_{\text{min}} = 5$ мкм; відстань між співпадаючою вузловою точкою та сітківкою – $l = 15$ мм.

Дано: $L = 10$ м; $h_{min} = 5$ мкм = $5 \cdot 10^{-6}$ м; $l = 15$ мм = 0,015 м.

Знайти: H_{min}

Розв'язок:

Роздільна здатність ока визначається відстанню між колбочками, тобто мінімальним розміром зображення предмета на сітківці. Розмір зображення на сітківці предмета розміром H складає: $h = \frac{l}{L} H$,

де L – відстань до предмета; l – відстань між співпадаючою вузловою точкою та сітківкою. Розмір зображення на сітківці не може бути менше середньої відстані між колбочками. При мінімальному розмірі предмета $h = h_{min}$.

З вищезазначеної формули отримуємо мінімальний розмір предмета, помітний оком на відстані, тобто роздільну здатність ока на цій відстані:

$$H_{min} = h_{min} \cdot \frac{L}{l}.$$

Підставимо чисельні дані:

$$H_{min} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10}{0,015} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,3 \text{ мм}.$$

Приклад 22. Хвилинний об'єм крові у спокої складає $Q_1 = 5$ л/хв, а при інтенсивній фізичній роботі може зростати до $Q_2 = 25$ л/хв. Визначити тип течії крові в аорті для цих двох випадків. Діаметр аорти $D = 2$ см, в'язкість крові $\eta = 5$ мПа·с, густина $\rho = 1050$ кг/м³, значення числа Рейнольдса $Re_{кр} = 2000$.

Дано: $Q_1 = 5$ л/хв = $8,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $Q_2 = 25$ л/хв = $41,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $D = 2$ см = 0,02 м.

Табличні величини, константи: $\eta = 5$ мПа·с – в'язкість крові; $\rho = 1050$ кг/м³ – густина крові; $Re_{кр} = 2000$ – критичне значення числа Рейнольдса.

Знайти: Re_1, Re_2

Розв'язок:

Для визначення типу течії крові обчислимо значення числа Рейнольдса для кожного випадку:

$$Re = \frac{D \nu \rho}{\eta}.$$

Лінійна швидкість v пов'язана з об'ємною Q таким чином:

$$Q = vS = v \cdot \frac{\pi D^2}{4},$$

де $S = \frac{\pi D^2}{4}$ - площа перерізу аорти діаметром D .

Виразимо лінійну швидкість: $Re = \frac{4\rho Q}{\pi\eta D}$.

Підставивши чисельні дані, набуваємо значення числа Рейнольдса:

- у стані спокої: $Re_1 = \frac{4 \cdot 1050 \cdot 8,3 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02} = 1110$;

- при фізичному навантаженні: $Re_1 = \frac{4 \cdot 1050 \cdot 41,5 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02} = 5578$.

Таким чином, у спокої течія крові по аорті ламінарна ($Re < Re_{кр}$), а при інтенсивному фізичному навантаженні може перейти в турбулентне ($Re > Re_{кр}$).

Приклад 23. Визначити ефективність дихання людини масою 75 кг, яка за один подих вдихає 500 мл повітря.

Дано: $V_t = 500$ мл; $F_a = 5,3\%$; $F_e = 0,03\%$; $F_g = 3,7\%$.

Знайти: ε

Розв'язок:

Для розрахунку точного об'єму повітря в мертвому просторі користуються формулою (136):

$$V = \frac{F_a - F_g}{F_a - F_e} \cdot V_t = \frac{5,3 - 3,7}{5,3 - 0,03} \cdot 500 = 151,8 \text{ мл.}$$

Ефективність дихання людини: $\varepsilon = \frac{V_t - V}{V_t} \cdot 100\% = \frac{500 - 151,8}{500} \cdot 100\% = 69,6\%$.

4.3. Задачі для самостійного розв'язання

4.3.1. Математичне моделювання складних біологічних систем

111. Обчисліть час напіввиведення $t_{1/2}$ нальбуфіна, якщо його константа елімінації складає $k_{el} = 0,17 \text{ год}^{-1}$.
112. Обчисліть константу елімінації k_{el} люміналу, якщо його час напіввиведення складає $t_{1/2} = 3$ доби.
113. Пацієнтові ввели внутрішньовенно препарат $m_0 = 200$ мкг. Обчисліть масу m препарату в крові через $t = 2$ год після введення. Константа елімінації цього препарату $k_{el} = 0,17 \text{ год}^{-1}$. Процес елімінації описується однокамерною моделлю.
114. Визначте час напіввиведення $t_{1/2}$ препарату, якщо за час $t = 3$ год спостереження за пацієнтом концентрація препарату в крові зменшилася з $c_0 = 100$ до $c = 30$ мкг/л. Процес елімінації описується однокамерною моделлю.
115. Знайдіть початкову концентрацію c_0 препарату в крові, якщо через час $t = 10$ год після внутрішньовенного введення його концентрація становить $c = 30$ мкг/л. Час напіввиведення цього препарату $t_{1/2} = 8$ год. Процес елімінації описується однокамерною моделлю.
116. Популяція бактерій росте в умовах обмеженого харчування. Чи можна зупинити подальший ріст популяції бактерій, розпочавши з деякого моменту часу знищувати їх з постійною швидкістю? Визначити мінімальну швидкість, при якій це можливо, якщо на початковий момент часу чисельність популяції складала 2500 бактерій. Відомо: при надлишку живлення за годину популяція бактерій збільшується на 80%. Рівноважне число бактерій – 15000.
117. Популяція бактерій росте зі швидкістю, пропорційною її чисельності. Визначити, через який час чисельність популяції досягне величини 10^8 , якщо за першу годину число бактерій зросло з 1 до 1000. Який інтервал між послідовними діленнями?

118. Популяція бактерій росте в умовах обмеженого харчування. У деякий момент часу бактерії почали гинути з постійною швидкістю. Чи можна зупинити загибель популяції? Визначити мінімальну чисельність популяції, при якій це можливо, якщо швидкість загибелі складає 600 бактерій/годину. Відомо: при надлишку живлення за годину популяція бактерій збільшується на 80%. Рівноважне число бактерій – 15000.
119. Чисельність культури бактерій при необмеженому харчуванні за 5 годин збільшилась від $2 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^8$ клітин. Який інтервал між послідовними діленнями, якщо смертність відсутня?
120. Бактеріальні клітини розмножуються зі швидкістю, пропорційною їх чисельності, і має місце приплив клітин ззовні з постійною швидкістю. Чи буде знищена популяція, якщо з деякого моменту часу розпочинається їх загибель за квадратичним законом?

4.3.2. Біофізика зорової системи людини та тварин

121. Як зміниться інтенсивність люмінесценції при збільшенні оптичної щільності зразка при довжині хвилі світла, що призводить до збудження зразка з 1 до 100?
122. Людина з хорошим зором без напруги може читати на відстані $d = 20$ см. Обчисліть межі акомодатії ΔD (у одиницях оптичної сили) її очей.
123. Короткозора людина користується окулярами з оптичною силою $D_0 = -4$ дптр. Визначте відстань d найкращого зору для неї, вважаючи окуляри і око близько розташованими тонкими лінзами.
124. Далекозора людина без напруги розрізняє предмети на мінімальній відстані $a = 40$ см. Обчисліть оптичну силу D окулярів, які необхідно виписати, щоб відстань найкращого зору склала $d = 25$ см.
125. Як оцінить людина розмір H предмета, що знаходиться на відстані $L = 3$ м від ока, якщо розмір зображення цього предмета на сітківці $h = 400$ мкм. Відстань між сітківкою та вузловою точкою, що з нею співпадає $l = 17,5$ мм.

126. Абсолютний поріг чутливості ока на довжині хвилі $\lambda = 500$ нм складає приблизно $E = 2,5 \cdot 10^{-17}$ Дж на поверхні рогівки ока. Скільком квантам світла відповідає ця енергія?
127. Мінімальна інтенсивність світла, що сприймається оком при радіусі зіниці $r = 1$ мм, дорівнює $I_{min} = 10^{-11}$ Вт/м² на довжині хвилі $\lambda = 500$ нм, на сітківку при цьому потрапляє $N = 40$ квантів світла в секунду. Нехтуючи відображенням світла, обчисліть сумарний коефіцієнт поглинання k оптичних середовищ ока.
128. Людина знаходиться в темній камері, в якій є невеликий отвір для проходження світлового пучка. При відкриванні на 10 с заслінки, яка перекриває отвір, світловий пучок інтенсивністю 20 квантів/с проходить у камеру і викликає відчуття, близьке до порогового. Яку необхідно вибрати інтенсивність пучка, коли заслінка відкривається тільки на 2 с?
129. Людина з нормальним зором чітко розрізняє предмети на відстані 20 см. Яка заломлювальна сила кришталіка?
130. Заломлювальна сила рогівки становить $P_p = 43$ дптр, а заломлювальна сила кришталіка $P_k = 19,1$ дптр. Знайти заломлювальну силу діоптрійного апарату ока P_0 , якщо відстань між рогівкою і кришталіком $d = 5,6$ мм, $n = 1,336$.

4.3.3. Біофізика системи кровообігу. Основні закони гемодинаміки

131. Обчисліть в'язкість крові η при нормальному гематокриті ($c = 45$ %), якщо в'язкість плазми складає $\eta_0 = 2,0$ мПа·с.
132. Обчисліть максимальний хвилинний об'єм крові, при якому протікання крові в аорті залишається ламінарним. Діаметр аорти $d = 2$ см, в'язкість крові $\eta = 5$ мПа·с, щільність $\rho = 1050$ кг/м³, критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр} = 2300$.
133. Середня швидкість кровотоку в аорті складає $v_{aop} = 0,45$ м/с, а в капілярах – $v_{кап} = 0,5$ мм/с. В скільки разів площа поперечного перерізу аорти менше суми поперечних перерізів капілярів?

134. Обчисліть гідравлічний опір X аорти, якщо її діаметр складає $D = 2,4$ см, довжина $l = 40$ см, в'язкість крові $\eta = 5$ мПа·с.
135. Обчисліть швидкість v осідання одиничних еритроцитів, вважаючи їх сферичними частинками діаметром $d = 7$ мкм. В'язкість плазми $\eta = 2$ мПа·с, густина еритроцитів $\rho_{\text{ер}} = 1090$ кг/м³, густина плазми $\rho_{\text{пл}} = 1050$ кг/м³.
136. В результаті лабораторного виміру швидкість осідання еритроцитів виявилася рівною $v = 10$ мм/год. Використовуючи початкові данні задачі 135, обчисліть середнє число N еритроцитів в агрегаті, якщо середній об'єм одиничного еритроцита дорівнює $V_0 = 100$ мкм³.
137. Швидкість поширення пульсової хвилі по артерії складає $v = 10$ м/с. Визначте модуль пружності E артерії, якщо товщина її стінки $h = 0,7$ мм, внутрішній діаметр $d = 8$ мм, густина крові $\rho = 1050$ кг/м³.
138. Швидкість пульсової хвилі в артеріях 1,2 мм діаметром становить 10 м/с. Визначити модуль пружності стінки артерії 0,1 мм завтовшки, коли її питома густина дорівнює 1200 кг/м³.
139. Серце собаки «прокачує» щосекунди 40 мл крові. Розрахувати падіння тиску крові в аорті 10 см діаметром і 40 см завдовжки.
140. Середня швидкість крові в аорті 10 мм діаметром становить 0,4 м/с. У капілярі 0,008 мм діаметром швидкість крові 0,5 мм/с. Через яку кількість капілярів протікає кров?

4.3.4. Газообмін у легенях і тканинах. Робота дихання

141. Робота легенів при фізичному навантаженні збільшилася в 2 рази, частота дихання у 1,5 рази. У скільки разів при цьому зміниться дихальний об'єм, якщо внутрішньолегеневий тиск виросте в 1,2 рази?
142. Робота легенів при фізичному навантаженні зросла в 10 разів, частота дихання в 2 рази, внутрішньолегеневий тиск підвищився до 2000 мм рт.ст. Чому дорівнював дихальний об'єм, якщо в спокійному стані він дорівнював 500 мл при внутрішньолегеневому тиску 800 мм рт.ст.?

143. Як зміниться робота легенів при фізичному навантаженні, якщо дихальний об'єм зросте в 2 рази, внутрішньолегеновий тиск у 1,2 рази, а частота дихання зросте на 50%?
144. В результаті захворювання легенів дихальний об'єм знизився у 2 рази. Визначити в скільки разів повинна зрости частота дихання хворої людини при підйомі на сходи, якщо в здоровому стані при цьому було потрібне збільшення роботи дихання на 50%.
145. У скільки разів зросла робота легенів при фізичному навантаженні, якщо внутрішньолегеновий тиск підвищився з 800 до 1000 мм рт.ст. при двократному збільшенні дихального об'єму.
146. Визначте, у скільки разів в результаті захворювання легенів знизився дихальний об'єм, якщо частота дихання хворої людини при підйомі по сходах, відносно здорового стану збільшилася на 50% при зниженні внутрішньолегенового тиску на 20%.
147. Робота легенів при фізичному навантаженні збільшилася в 2 рази, частота дихання у 1,5 рази. У скільки разів при цьому зміниться дихальний об'єм, якщо внутрішньолегеновий тиск виросте в 1,2 рази.
148. У скільки разів зросла робота легенів при фізичному навантаженні, якщо частота дихання збільшилася у 1,5 рази при двократному збільшенні дихального об'єму.
149. Як змінилася частота дихання після занять людини спортом з наступним відпочинком. Робота легенів при цьому зменшилася на 35%, а дихальний об'єм зменшився на $\frac{1}{3}$.
150. Як зміниться робота легенів при заняттях людини спортом, якщо дихальний об'єм зріс на 50%, внутрішньолегеновий тиск – на 75%, а частота дихання у 2 рази?

4.4. Контрольні питання

1. Чому ушкодження великих вен вважаються небезпечними, ніж ушкодження великих артерій (за умови своєчасної допомоги по зупинці кровотечі)?
2. Сформулюйте закон Оствальда.
3. Як визначається потужність серця?
4. Від яких фізичних властивостей середовища залежить вектор Умова?
5. Осмотичний ефект в живих клітинах супроводжується їх набряканням в гіпотонічному розчині та стискуванням в гіпертонічному. Чи буде спостерігатися осмотичний ефект при накопиченні йонів натрію за схемою антипорта?
6. Показати, що рівняння Нернста-Планка зводиться до рівняння Фіка для дифузії незаряджених часток.
7. Який зв'язок коефіцієнта дифузії з в'язкістю середовища?
8. Перерахуйте основні види руху в системі кров-судина.
9. Перерахуйте межі застосовності закону Пуазейля.
10. Перерахуйте особливості течії крові при локальному звуженні посудини.
11. Оцініть, скільки часу еритроцит знаходиться в капілярі.
12. Активним чи пасивним є вдихання повітря?
13. Завдяки чому у людини можливий бінокулярний зір?
14. В яких напрямках збільшується об'єм грудної клітки при вдиханні?
15. В якій частині судинного русла тиск падає найрізкіше і чому?
16. В чому перебуває функція рецептора?
17. Внаслідок чого кров, що викидається серцем переривчасто, рухається по судинах безперервно?
18. З яких компонентів складається життєва ємність легенів?
19. З яких трьох основних фаз складається цикл діяльності серця людини?
20. Як класифікуються рецептори за характером сприйманих роздратувань?
21. Як визначити об'ємні співвідношення плазми та формових елементів крові?
22. Як пристосовується око до ясного бачення на різній відстані?
23. Які аномалії рефракції Ви знаєте?

24. Які рецептори сприймають звукові коливання?
25. Які сили утримують легені в розтягнутому стані?
26. Які елементи ока відповідають за колірний зір?
27. Яка роль зорових пігментів?
28. Яке зображення виходить на сітківці?
29. Назвіть заломлюючі поверхні та середовища ока.
30. Перерахуйте усі відомі Вам чинники, сприяючі руху крові по венах.
31. Що називають точкою зору?
32. Що таке еластична тяга легенів?

5. БІОСФЕРА ТА ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЖИВОГО ОРГАНІЗМУ

Практичні завдання п'ятого розділу присвячені визначенню основних характеристик з якими зовнішнє середовище (електромагнітне, теплове поле, йонізуюче випромінювання) діє на біологічні об'єкти та їх системи [7, 8, 21, 31]. Завершує розділ блок завдань, що присвячений розв'язанню задач по оптичному дослідженню біологічних об'єктів [14, 18, 28].

5.1. Основні теоретичні відомості

Електричні властивості біологічних тканин.

Взаємодія електромагнітного поля з біологічними тканинами

В медичній практиці суттєве значення надається методам впливу на біологічні об'єкти зі сторони електромагнітних полів та електричних струмів, як постійних, так і змінних.

Так, широкого застосування набули такі електродинамічні процеси та характеристики електричного струму.

Гальванізація та електрофорез:

– для зменшення болю при невралгіях, невритах, нейроміозитах, плекситах, радикулітах; для посилення регенеративних процесів, якщо є порушення провідності нервових шляхів при травматичних, інфекційних, токсичних невритах, плекситах, парезах, паралічах;

– з метою регулюючого впливу на функції центральної нервової системи при неврозах, гіпертонічній хворобі I-II стадії, виразковій хворобі, порушеннях сну, наслідків контузій, струсів мозку, судинних розладів у ділянці головного мозку та кінцівок;

– для покращення обміну та трофіки тканин; для розсмоктування інфільтратів при хронічних та підгострих запальних процесах у суглобах, органах малого тазу тощо.

Вибір йону при електрофорезі диктується його фармакологічною дією.

Наприклад:

– електрофорез новокаїну застосовують для знеболювання при невритах, невралгіях, розтягненні зв'язок, забитті;

– електрофорез кальцію – при захворюваннях вегетативної нервової системи, порушенні обміну кальцію, для покращення трофіки кісток, підвищення здатності крові згортатися при кровотечах;

– електрофорез йоду – при атеросклерозі церебральних судин, травматичних невритах, деяких запальних процесах у малому тазу, післяопераційних спайках, рубцях.

Імпульсний струм низької частоти та низької напруги: неврози з порушенням сну, фантомно-больовий синдром, астеноневротичний синдром при початковому атеросклерозі судин мозку, гикавка тощо.

Змінний струм високої частоти: невралгії, випадіння волосся, шкірні парестезії, трофічні виразки, рани, які погано загоюються, тріщини заднього проходу, геморої.

Індуктотермія: підгострі та хронічні запальні процеси, особливо ті, що розташовані глибоко у тканинах та органах, пневмонія, артрити, радікуліти, плексити, неврити, спастичні коліти, гострий нефрит.

Електричне поле ультрависокої частоти: гострі запальні процеси, фурункули, карбункули, гідраденіти, синусити, гайморити, хронічні тонзиліти, отити, остеомієліти, відмороження усіх спупенів.

Мікрохвильова терапія: такі ж як при УВЧ-терапії, а також бурсити, міозити, періартрити, захворювання зв'язочного апарату та сухожилля.

Постійне електричне поле високої напруги:

– франклінізація: невротичні стани, що супроводжуються головним болем та безсонням;

– електроаерозоль-інгаляція: бронхіальна астма, бронхіти, гострі та хронічні запалення легенів.

Фізичною природою виділення тепла при проходженні струму через провідник є те, що потенціальна енергія носіїв заряду, які подолали ділянку кола зменшується, а кінетична енергія залишається в середньому однаковою на початку й у кінці шляху.

Втрачена носіями заряду енергія дисипує, тобто передається коливанням атомів провідника і переходить у тепло.

Закон Джоуля-Ленца (Джеймс Прескотт Джоуль, 1840 рік; Еміль Ленц, 1842 рік) – фізичний закон, що дає кількісну оцінку теплової дії електричного струму.

Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі (кількість теплоти, що виділяється при діатермії):

$$q = j^2 \rho = jE \text{ [Дж]}, \quad (144)$$

де $q = \frac{Q}{V \cdot \Delta t}$ - кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу [Дж], ρ - питомий опір [Ом·м], j - густина струму [А/м²].

Індуктотермія – це метод фізіотерапії, який базується на застосуванні магнітного поля високої частоти.

Магнітне поле (з частотою 13,56; 27,12; 40,68 МГц) утворюється при проходженні по провіднику індуктора (що представляє собою плоску, конічну, циліндричну спіраль або петлю) змінного струму зазначеної частоти, що підключається до апаратів для індуктотермії та УВЧ-терапії.

Магнітне поле, яке підводиться до пацієнта за законом електромагнітної індукції збуджує и проводить електричний струм по тканинах, внутрішніх органах і рідких середовищах організму вихрові струми високої частоти, або струми Фуко, які викликають утворення тепла.

Під впливом індуктотермії нормалізується діяльність нервової системи, стимулюється функція різних органів і залоз внутрішньої секреції, підвищується на 1...6°C (та більше) місцева і незначно (на 0,3...0,9 °C) загальна температура тіла, нормалізується обмін речовин, поліпшується кровообіг, посилюються захисні реакції організму, затримується розмноження патогенних мікробів.

Кількість теплоти, що виділяється при індуктотермії:

$$q = k \frac{B^2 \omega^2}{\rho} \text{ [Дж]}, \quad (145)$$

де B – індукція магнітного поля, [Тл], ρ - питомий опір [Ом·м], ω - частота зміни індукції магнітного поля, k - коефіцієнт пропорційності, який залежить від геометричних розмірів та форм ділянки біологічної тканини.

Тепловий ефект, обумовлений струмом зміщення:

$$q = k \omega \varepsilon E^2 \text{ [Дж]}, \quad (146)$$

де ε – діелектрична проникність середовища, E – амплітуда значення напруженості електричного поля, k – коефіцієнт пропорційності.

Частотні характеристики електричного опору різних тканин подібні, але значення повного опору (імпедансу) – різні.

Наприклад, кісткова тканина містить багато кристалів фосфату кальцію, тому має більший імпеданс, ніж м'які тканини.

Метод вимірювання імпедансу використовують у медичних дослідженнях, а саме: при вивченні процесів у живих клітинах і тканинах за впливу випромінювання, ультразвуку та інших фізичних чинників, а також під час зміни фізіологічного стану.

Наприклад, виявлено, що внаслідок запальних процесів на перших стадіях хвороби збільшується опір тканини.

Це пояснюється тим, що під час запалення клітина набрякає, міжклітинні проміжки зменшуються, активний опір збільшується.

На наступних стадіях запального процесу змінюються структура та хімічний склад клітин, що призводить до зменшення ємності та опору.

Отже, вимірювання електричних параметрів тканин може використовуватись як засіб діагностики стадій запальних процесів.

Виявлено, що на різних стадіях утворення злоякісних пухлин ємнісний опір тканини змінюється.

Тому цей показник можна використати для ранньої діагностики захворювання.

Під час відмирання тканини, а також під дією ушкоджувальних чинників (радіація, ультразвук, температура) збільшується проникність мембран і, як наслідок, збільшуються йонні потоки - послаблюється ефект поляризації на межі розділу.

Це зумовлює зменшення опору та ємності об'єкта за низьких частот, а за високих - поляризація на межі розділу практично відсутня, тому високочастотний опір майже не змінюється.

Таким чином, під час дії ушкоджувальних чинників та відмирання тканини дисперсія її електричних параметрів зменшується. Дисперсія таких параметрів мертвої тканини взагалі відсутня.

Коефіцієнт дисперсії імпедансу:

$$A = \frac{Z_{f.ч.}}{Z_{в.ч.}}, \quad (147)$$

де $Z_{н.ч}$ та $Z_{в.ч}$ – імпеданс (повний опір) при низьких та високих частотах [Ом].

Теплова дія електромагнітного поля

Тепло, що виділяється в розчинах електролітів під дією УВЧ-електричного поля, яке викликає струм провідності:

$$Q = K_2 \cdot \sigma \cdot E_{эф}^2 \cdot V \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (148)$$

де Q – кількість тепла [Дж], що виділяється в об'ємі V за час t в тканинах, що мають електропровідність σ [См]; $E_{эф}$ – ефективне значення напруженості електричного поля [В/м].

Кількість тепла, що виділяється в об'ємі V діелектрика за час t внаслідок діелектричних витрат:

$$Q = K_3 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \nu \cdot E_{эф}^2 \cdot \text{tg } \delta \cdot V \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (149)$$

де ε - діелектрична проникність, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна, ν - частота зміни знаку поля, $\text{tg } \delta$ - тангенс кута витрат.

Кількість тепла Q , що виділяється в об'ємі розчину V за час t :

$$Q = K_1 \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot B_{эф}^2 \cdot V \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (150)$$

де $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна частота, $B_{эф}$ – ефективне значення магнітної індукції [Тл].

Коефіцієнти K_2 , а далі K_1 , K_3 залежать від вибору системи одиниць виміру, міри неоднорідності поля, розмірів електродів та їх розташування.

Дія йонізуючого випромінювання на речовину та основи дозиметрії

Йонізація та збудження атомів та молекул опроміненої речовини – найважливіші первинні фізичні процеси, що обумовлюють пусковий механізм біологічної дії випромінювань.

Передача енергії випромінювань атомам і молекулам біосубстрату – це тільки найперший, фізичний етап дії, яка відбувається в клітині, а згодом у тканинах і в усьому організмі.

Наступний етап – хімічний, або радіаційно-хімічний етап променевого ураження клітини.

В основі первинних радіаційно-хімічних змін молекул лежать два механізми:

- пряма дія, коли молекула зазнає зміни безпосередньо при взаємодії з опроміненням;
- непряма дія – змінювана молекула безпосередньо не поглинає енергії випромінювання, а одержує її шляхом передачі від іншої молекули.

Первинні фізико-хімічні зміни, що відбуваються у перші частки секунди, призводять до утворення наступних ланок реакцій, що розвиваються вже після безпосереднього акту опромінення і спричинюють глибокі зміни в клітинах і тканинах через досить значні проміжки часу.

Йонізуюче випромінювання проникає в біологічний матеріал і взаємодіє з молекулами і атомами (фізична сфера). Внаслідок цього ефекту уражений орган може змінитися безпосередньо.

Однак частіше утворюються проміжні продукти-переважно продукти дисоціації опроміненої води (хімічна сфера): радикали H^+ і OH^- , що можуть змінити ферменти або уражений орган.

Крім того, утворюються активні сполуки цих радикалів – H_2O_2 та $O-H$ й інші перекиси, які також можуть призвести до зміни ферментів і ураження опроміненого органа (біохімічна сфера).

Зміни хромосом, прямі чи побічні, призводять до різних біологічних проявів (біологічна сфера).

Хімічна активність йонізуючого випромінювання дуже висока, а біологічна ще вища, тому смерть організму настає внаслідок дії дуже малих енергетичних доз випромінювання, при яких початкові фізико-хімічні зміни лежать за межами найбільш чутливих аналітичних методів.

При таких дозах енергії безпосередні прямі порушення в хімічних зв'язках біомолекул дуже невеликі і вирішальну роль в ураженні відіграють процеси, за яких відбувається посилення первинного ефекту, що розвиваються вже після впливу йонізуючої радіації.

Істотну роль у дії йонізуючих випромінювань відіграє водна фаза клітин і тканин організмів, за рахунок радикалів, що утворюються при радіолізі води у водних фазах колоїдів клітин і тканин. Значення подібної активації полягає в тому, що акт розкладання води на радикали потребує порівняно малої енергії, а утворені радикали мають дуже високу хімічну активність.

Водні фази безпосередньо межують з поверхнями біомолекул, які мають велику кількість активних реакційних груп. Водні містки, що розділяють ці молекули, не перевищують 3-4 молекулярні радіуси.

За таких умов радикали, що утворилися, мають можливість безпосередньо реагувати з біомолекулами, а процеси рекомбінації мінімальні. Радикали, що утворилися при радіолізі води окислюють і відновлюють різні органічні сполуки.

В первинній стадії променевого ураження вирішальна роль належить реакціям окислювання, і біологічна дія пов'язується з радикалами, що окислюють – OH та OH₂.

Дію радіації називають прямою, коли йонізуються молекули органічних компонентів клітини, і непрямую, коли випромінювання діє на біосубстрат внаслідок утворення високоактивних продуктів гідролізу води.

Встановлено, що далеко не вся поглинена тканинами енергія йонізуючих випромінювань спричиняє біологічний ефект.

Ймовірність взаємодії квантів енергії з біосубстратом, коли йонізаційний акт спричинить реакції в клітинах, дуже мала (0,01-0,0001), а кількість енергії, що спричиняє загибель клітин, незначна.

Короткохвильова границя гальмівного випромінювання:

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{e \cdot U} = \frac{12,42}{U} \cdot 10^{-7} \text{ [м]}, \quad (151)$$

де $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд йонізованої β -частки (електрон); U – напруга між катодом і антикатодом [В].

Вже через кілька років після відкриття рентгенівських променів Ч. Баркла (1877-1944) виявив, що при дії потоку рентгенівського випромінювання високої енергії на речовину виникає вторинне флуоресцентне рентгенівське випромінювання, характеристичне для досліджуваного елемента.

Незабаром після цього Г. Мозлі в серії своїх експериментів виміряв довжини хвиль первинного характеристичного рентгенівського випромінювання, отриманого електронним бомбардуванням різних елементів, і вивів співвідношення між довжиною хвилі і атомним номером. Ці експерименти, а також винахід Брегом рентгенівського спектрометра, заклали основу для спектроскопічного рентгенівського аналізу.

Потік рентгенівського випромінювання:

$$\hat{O} = k Z \cdot U^2 I \text{ [Вт]}, \quad (152)$$

де $k = 10^{-9}$ Вт/В²·А, Z – порядковий номер речовини антикатада, I – сила струму в рентгенівській трубці [А].

Закон Мозлі (емпірично встановлена залежність частоти та довжини хвилі серій характеристичного рентгенівського випромінювання від атомного номера хімічного елемента):

$$\nu = R(Z - \delta)^2 \left(1 - \frac{1}{2^2} \right) \text{ [Гц]}, \quad (153)$$

де $R = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – стала Рідберга; δ – постійна екранування; Z – порядковий номер речовини антикатада.

Радіоактивністю називається здатність нестійких ізотопів хімічних елементів самочинно перетворюватись в інші більш стійкі елементи з випромінювання альфа-, бета-, гамма-променів тощо.

Радіоактивність ізотопів, які знаходяться в природних умовах, отримала назву природної радіоактивності, а радіоактивний розпад ядер атомів при їх бомбардуванні елементарними частинками (електронами, протонами, нейтронами, альфа-частинками та іншими) – штучною радіоактивністю.

Процес перетворення одного ізотопу в інший називається радіоактивним розпадом. Радіоактивне перетворення протікає самочинно та ймовірність радіоактивного розпаду за одиницю часу є сталою для кожного радіоактивного елементу.

Відповідно, кількість актів радіоактивного розпаду dN за час dt визначається кількістю радіоактивних ядер N у даний момент часу t :

Основний закон радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (154)$$

де N_0 - вихідна кількість радіоактивних ядер, N – їх кількість в момент часу t , λ - стала розпаду [с^{-1}].

Період напіврозпаду – це час, протягом якого квантово-механічна система (ядро атома, елементарна частинка, енергетичний рівень тощо) розпадається з ймовірністю $\frac{1}{2}$.

Якщо розглядається ансамбль незалежних частинок, то протягом одного періоду напіврозпаду кількість частинок, що залишилися, зменшується в середньому вдвічі):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ [с]}. \quad (155)$$

Активність (число розпадів, які відбуваються з ядрами зразка за 1 с):

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{0,693N}{T_{1/2}} \text{ [Бк, 1 Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк]} \quad (156)$$

де λ - стала розпаду [с^{-1}].

Товщина шару половинного послаблення (товщина шару речовини при проходженні якого інтенсивність γ -випромінювання та нейронів зменшується вдвічі):

$$d_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} = \frac{23}{\rho} \text{ [м]}, \quad (157)$$

де μ – молярна маса речовини [кг/моль]; ρ – густина речовини [кг/м³].

Експозиційна доза (фізична величина рівна відношенню суми електричних зарядів всіх йонів одного знаку, які звільнюються в опромінюваному повітрі (за умови повного використання йонізуючої здатності електронів) до маси цього повітря):

$$D_0 = \frac{q}{m} \text{ [Кл/кг, 1 Р = } 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг]}, \quad (158)$$

де q – заряд [Кл], m – маса [кг].

Потужність експозиційної дози (величина, яка дорівнює відношенню дози випромінювання до часу опромінення):

$$P_0 = \frac{D_0}{t} = \frac{q}{mt} = \frac{I}{m} \text{ [А/кг, Р/с]}, \quad (159)$$

де I – сила струму [А].

Поглинена доза (фізична величина, яка дорівнює відношенню енергії випромінювання до маси опромінюваної речовини):

$$D_n = \frac{W}{m} \text{ [Дж/кг, Гр, 1 рад = } 10^{-2} \text{ Гр.]}, \quad (160)$$

де W – енергія поглиненої радіації [Дж].

Зв'язок між поглиненою і експозиційними дозами:

$$D_n = fD, \quad (161)$$

де f – коефіцієнт (так, для повітря $f = 0,869$; для м'яких тканин тіла людини $f = 0,96 \approx 1$).

Потужність поглинутої дози:

$$P_n = \frac{D_n}{t} \text{ [Дж/кг·с, Гр/с, Вт/кг, рад/с]}. \quad (162)$$

Біологічна доза (доза будь-якого виду йонізуючого випромінювання, що викликає такий же біологічний вплив, що й доза рентгенівського або γ -випромінювання в 1 Рентген):

$$D_{\sigma} = k D_n = k f D_0 \text{ [Зв, 1 бер} = 10^{-2} \text{ Зв]}, \quad (163)$$

де k – коефіцієнт якості (відносна біологічна ефективність) випромінювання.

Оптичні дослідження

Закон Снеліуса (закон заломлення) визначає напрям розповсюдження променя світла, який падає на плоску границю розділу двох середовищ (рис.9):

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}, \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (164)$$

де n_{21} – відносний показник заломлення другого середовища щодо першого:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}; \quad i_1, i_2 \text{ – кути падіння та заломлення [рад].}$$

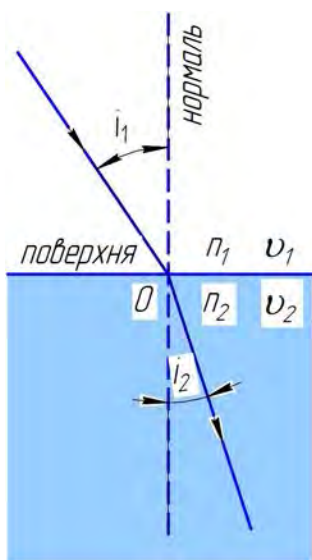


Рис.9. Схема заломлення світлового променя на границі двох середовищ

Абсолютний показник заломлення – це характерне для середовища число, яке визначає в скільки разів швидкість розповсюдження світла в середовищі менша за швидкість світла у вакуумі:

$$n = \frac{c}{v}, \quad n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (165)$$

де ϵ та μ – відповідно, електрична і магнітна проникність середовища.

Повне внутрішнє відбиття – явище непроникання косих світлових променів із середовища із більшою оптичною густиною в середовище із меншою оптичною густиною.

Світло все ж таки проникає в середовище із меншим показником заломлення на незначну глибину.

Це явище використовується в методі порушеного повного внутрішнього відбиття для дослідження приповерхневих шарів тіл.

Явище повного внутрішнього відбиття легко спостерігати, якщо пірнути у воду й глянути вгору. Синє небо над головою буде видно лише в межах певного кола.

Явище використовується у хвилеводах, зокрема оптичних волоконних лініях, де світло запускається в оптичне волокно із доволі високим показником заломлення.

Світло не може вирватися із волокна, навіть якщо це волокно зігнути чи скрутити в бухту, бо кут падіння залишається меншим за критичний кут повного внутрішнього відбиття.

Граничний кут при повному внутрішньому віддзеркаленні світла:

$$\sin i_{\infty} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \frac{\pi}{2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (166)$$

Оптична лінза – найпростіший оптичний елемент, виготовлений із прозорого матеріалу, обмежений двома заломлюючими поверхнями, які мають спільну вісь, або взаємно перпендикулярні площини симетрії (рис.10).

При виготовленні лінз для видимого діапазону світла, використовують оптичне або органічне скло, в УФ діапазоні – кварц, флюорит тощо, в ІЧ-діапазоні – спеціальні сорти скла, кремій, сапфір, германій, ряд солей тощо.

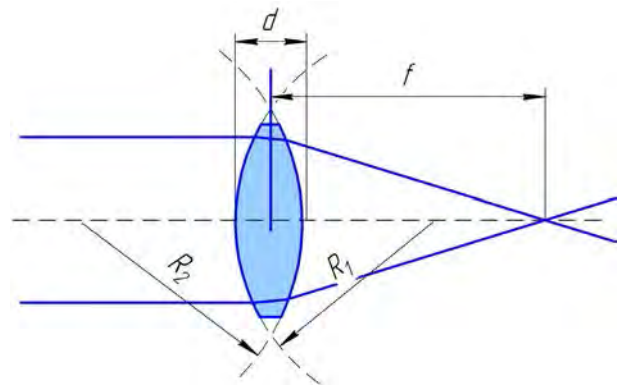


Рис.10. Конструкційна схема вигнутої лінзи

Здебільшого лінзи мають аксіальну симетрію й обмежені двома сферичними поверхнями однакового або різного радіусу.

Оптичні лінзи зазвичай виготовляються зі скла або пластику.

Природною оптичною лінзою є кришталик ока.

Лінзу називають тонкою, якщо її товщина мала порівняно з радіусами сферичних поверхонь, що її обмежують.

Сферичні тонкі лінзи бувають вигнуті та увігнуті.

Вигнуті лінзи мають властивість збирати заломлене світло (кожну з лінз можна умовно розділити на три частини, з яких краї – призми, що заломлюють промені до основи, а середина – плоскопаралельна пластинка), тому їх називають збиральними (у них середина товста, а краї тонші).

Увігнуті лінзи розсіюють світло після заломлення, їх називають розсіювальними (середина тонка, а краї товстіші).

Фокусна відстань:

$$f = \frac{1}{(n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \text{ [м]}, \quad (167)$$

де R_1, R_2 – радіуси кривизни лінзи [м].

Формула тонкої лінзи з фокусною відстанню f , рис.11:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}, \quad (168)$$

де s_1 та s_2 – відповідно, відстані від лінзи до об'єкта та до зображення [м].

Заломлювальна сила рогівки ока $P_p = 43$ Д, показник заломлення рогівки $n_p = 1,376$; заломлювальна сила кришталика $P_k = 19,1$ Д, $n_k = 1,42$.

Заломлювальна сила будь-якої увігнутої поверхні:

$$P = 1/f \text{ [Д]}, \quad (169)$$

де f - фокусна відстань [м].

Заломлювальна сила лінзи з передньою і задньою заломлювальними поверхнями (формула Гульстранда):

$$P = P_n + P_\zeta - \frac{d}{n} P_n P_\zeta \text{ [Д]}, \quad (170)$$

де P_n та P_ζ – заломлювальні сили відповідно передньої та задньої поверхонь [Д]; d – відстань між двома заломлювальними поверхнями [м]; n – показник заломлення лінзи.

Фотометрія – загальна для всіх розділів прикладної оптики наукова дисципліна, на основі якої проводяться кількісні вимірювання енергетичних характеристик поля випромінювання. (Рис11.)

Фотометрія як наука почалась в 1760-х з робіт Ламберта, який сформулював закон дифузного відбиття світла (закон Ламберта) і Бугера, який сформулював закон поглинання світла (закон Бугера-Ламберта-Бера).

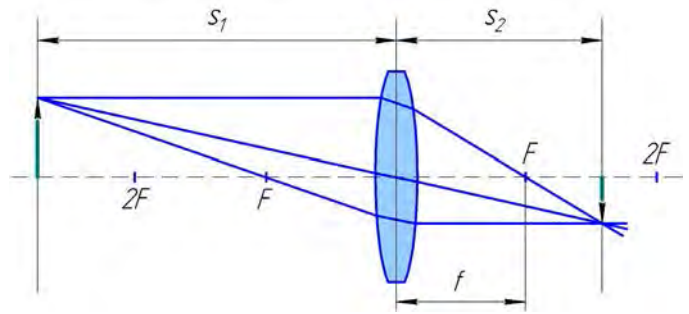


Рис.11. Схема до пояснення формули тонкої лінзи

Використовування терміну «світло» щодо описання поля випромінювання в будь-якій області спектрального діапазону оптичного випромінювання, а не лише в видимій його області, сьогодні є загальновизнаним («швидкість світла», «промінь світла»).

Основними величинами в фотометрії є: потік випромінювання, світимість, освітленість, сила світла, яскравість.

Потік випромінювання (величина, рівна відношенню енергії W випромінювання до часу t , за яке випромінювання відбулося – потужність випромінювання):

$$\hat{O}_e = \frac{W}{t} [\text{Вт, лм}], \quad (171)$$

де W – енергія випромінювання [Дж] за час t [с], за який випромінювання відбулося (потужність випромінювання).

Енергетична світимість (величина рівна відношенню потоку випромінювання Φ_e , що випускається поверхнею, до площі S перетину, крізь який цей потік проходить – поверхнева щільність потоку випромінювання):

$$R_e = \frac{\hat{O}_e}{S} [\text{Вт/м}^2, \text{лм/м}^2], \quad (172)$$

де S – площа перетину поверхні [м²].

Енергетична сила світла (величина, рівна відношенню потоку випромінювання Φ_e точкового джерела до тілесного кута ω , в межах якого це випромінювання розповсюджується – сила випромінювання):

$$I_e = \frac{\hat{O}_e}{\omega} [\text{Вт/ср}], \quad (173)$$

де ω – тілесний кут [ср].

Тілесний кут – це частина простору, що міститься усередині однієї порожнини конічної поверхні із замкнутою напрямною (рис.12).

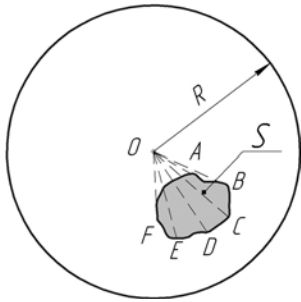


Рис.12. Схема
знаходження
тілесного кута

Тілесний кут вимірюється частиною сферичної поверхні (ABCDEF).

Мірою тілесного кута є відношення площі ABCDEF до квадрата радіусу кулі:

$$\alpha = \frac{S_{ABCDEF}}{R^2} \text{ [ср]}. \quad (174)$$

Одиниця виміру тілесного кута – стерадіан; це тілесний кут, що вирізає на поверхні кулі площу, рівну

площі квадрата, сторона якого дорівнює радіусу.

Цей захід виміру тілесних кутів подібний до виміру радіану плоских кутів.

Енергетична яскравість (відношення енергетичної сили світла ΔI_e елемента випромінюючої поверхні до площі ΔS проекції цього елемента на площину, перпендикулярну напрямку спостереження – променистість):

$$B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}, \quad B_\varphi = \frac{I}{S \cos \varphi} \text{ [Вт/ср}\cdot\text{м}^2, \text{кд/м}^2\text{]}, \quad (175)$$

де ΔI_e – енергетична сила світла елемента випромінюючої поверхні площею ΔS .

Енергетична освітленість (величину потоку випромінювання, падаючого на одиницю освітлюваної поверхні – опроміненість):

$$E = \frac{\hat{O}}{S} \text{ [Вт/м}^2, \text{лк]}. \quad (176)$$

Інтерференція світла – перерозподіл інтенсивності світла в результаті накладення (суперпозиції) декількох світлових хвиль.

Це явище супроводжується чергуванням в просторі максимумів і мінімумів інтенсивності. Її розподіл називається інтерференційною картиною.

Отримати стійку інтерференційну картину для світла від двох розділених у просторі і незалежних один від одного джерел світла не так легко, як для джерел хвиль на воді.

Атоми випромінюють світло цугами дуже малої тривалості, і когерентність порушується.

Порівняно просто таку картину можна отримати, зробивши так, щоб хвилі, які підлягають інтерференції були одного і того ж цуга.

Так, інтерференція виникає при розділенні початкового променя світла на два промені при його проходженні через тонку плівку, наприклад, плівку, що наносять на поверхню лінз у просвітлених об'єктивах.

Промінь світла, проходячи через плівку товщиною d , відіб'ється двічі – від внутрішньої та зовнішньої її поверхонь.

Відбиті промені матимуть постійну різницю фаз, що дорівнює подвоєній товщині плівки, від чого промені стають когерентними і будуть підлягати інтерференції.

Повне гасіння променів станеться при $d = \lambda/4$, де λ – довжина хвилі.

Якщо $\lambda = 550$ нм, то товщина плівки дорівнює $550:4 = 137,5$ нм.

Промені сусідніх ділянок спектра по обидва боки від $\lambda = 550$ нм інтерферують не повністю і лише послаблюються, внаслідок чого плівка набуває забарвлення.

Наближено, коли є сенс вести мову про оптичну довжину хвилі променів, для двох променів:

- умова інтерференційного максимуму:

$$\Delta = m\lambda_0 = 2m\lambda_0/2; \quad (177')$$

- умова інтерференційного мінімуму:

$$\Delta = (2m + 1)\lambda_0/2, \quad (177'')$$

де Δ - оптична різниця ходу [м], λ_0 – довжина хвилі [м], m – порядок інтерференційного спектру.

Дифракція – явище, що виникає при поширенні хвиль (наприклад, світлових і звукових хвиль). Суть цього явища полягає в тому, що хвиля здатна оминати перешкоди.

Це зумовлює те, що хвильовий рух спостерігається в області за перешкодою, куди хвиля не може потрапити прямо.

Явище пояснюється інтерференцією хвиль на краях непрозорих об'єктів або неоднорідностях між різними середовищами на шляху поширення хвилі.

Прикладом може бути виникнення кольорових світлових смуг в області тіні від краю непрозорого екрана. У випадку, коли хвиля падає на екран зі щілиною, вона проникає за перешкоду завдяки дифракції, проте спостерігається відхилення від прямолінійного розповсюдження хвиль.

Інтерференція хвиль за екраном призводить до виникнення темних та світлих областей, розташування яких залежить від напрямку, в якому ведеться спостереження, віддалі від екрана тощо.

Умова дифракційного мінімуму (повна темнота):

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad (178')$$

Умова дифракційного максимуму:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (178'')$$

де a – ширина щілини [м], λ – довжина хвилі [м], m – порядок дифракційного спектру.

Дифракційна ґратка – оптичний елемент з періодичною структурою, здатний впливати на поширення світлових хвиль так, що енергія хвилі, яка пройшла через ґратку, зосереджується в певних напрямках.

Напрямки поширення цих пучків залежать від періоду ґратки та довжини світлових хвиль, тобто дифракційна ґратка працює як дисперсійний елемент. Монохроматичний світловий пучок, що падає на ґратку, теж розділиться на декілька пучків, які поширюються в різних напрямках.

Дифракційні ґратки широко застосовуються у монохроматорах і спектрометрах. Принцип дії дифракційної ґратки ґрунтується на дифракції світлових хвиль, які взаємодіють із нею, та подальшій інтерференції цих дифрагованих хвиль.

У загальному випадку дифракційну ґратку можна уявити як сукупність багатьох паралельних та рівновіддалених прозорих щілин, розділених однаковими непрозорими проміжками.

Якщо на таку ґратку падатиме світловий пучок, то світлові хвилі, проходячи крізь щілини ґратки, будуть дифрагувати.

Кожна точка будь-якої щілини ґратки у такому разі виступатиме як вторинне джерело світла.

Таким чином, після взаємодії з ґраткою світлові хвилі будуть поширюватись у різних напрямках.

Однак світлові хвилі від різних щілин ґратки, інтерферують між собою.

Якщо ці хвилі перебувають в однаковій фазі, то вони підсилюють одна одну, якщо ж у протифазі, то гасять.

У першому випадку відбувається конструктивна інтерференція, у другому – деструктивна.

Напрямки поширення дифрагованих хвиль, на яких відбувається їх конструктивна інтерференція, називають дифракційними максимумами.

Таких максимумів зазвичай кілька, їх позначають цілими числами, які називаються порядком дифракції (m).

Постійна (період) дифракційних решіток (сумарна довжина прозорої та непрозорої ділянок дифракційної решітки):

$$d = \frac{1}{N_0}, d = a + b \text{ [мм]}, \quad (179)$$

де N_0 – число щілин, що приходиться на одиницю довжини, a – ширина щілини; b – ширина непрозорих ділянок між щілинами.

Роздільна здатність дифракційної решітки (зображення двох сусідніх спектральних ліній з рівною інтенсивністю і однаковими симетричними контурами розділеними для сприйняття, якщо центральний максимум дифракційної картини від однієї лінії співпадає з першим мінімумом дифракційної картини від іншої):

$$R_{a.\delta} = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = m \cdot N, \quad (180)$$

де m – порядок спектру; N – число щілин.

Закон Бугера-Ламберта-Бера – закон експоненційного зменшення інтенсивності світла в середовищі в залежності від товщини:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (181)$$

де I_0, I – відповідно, інтенсивність світла до та після проходження шару оптичної речовини товщиною x [м], α - коефіцієнт поглинання [м^{-1}].

Закон Малюса (визначення інтенсивності світла, що пройшло через поляризатор та аналізатор (Етьєн Луї Малюс, 1810 рік):

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \psi, \quad (182)$$

де I_0, I – відповідно, інтенсивність світла до та після проходження поляризатора та аналізатора, ψ - кут обертання площини аналізатора відносно площини поляризатора [рад].

Оптична активність – здатність речовини повертати площину поляризації світла.

Речовини, які можуть повертати площину поляризації світла, називаються *оптично-активними*.

Такі речовини не повинні мати симетрії інверсії. Оптична активність може бути природною і наведеною зовнішніми полями.

Серед основних законів оптичної активності слід відмітити закони Біо, Фарадея.

Кут повороту площини поляризації:

$$\varphi = a \cdot d \text{ [рад]}; \quad (183)$$

- для розчинів:

$$\varphi = a \cdot c \cdot d \text{ [рад]}, \quad (184)$$

де d – товщина шару речовини [м], a – питоме обертання [$\text{рад} \cdot \text{м}^2$] – кут повороту площини поляризації шаром оптично активної речовини одиничної товщини, c – концентрація розчину [м^{-3}].

Закон Біо (Жан-Батіст Біо, 1815 рік):

$$\alpha \approx \lambda_0^2, \quad (185)$$

де λ_0^2 - довжина світла у вакуумі.

Ефект Фарадея полягає у виникненні оптичної активності в середовищі під дією магнітного поля.

При поширенні світла в оптично ізотропному середовищі або в напрямку оптичної осі кристалу і прикладанні магнітного поля вздовж напрямку поширення світла, ефект Фарадея проявляється у повертанні площини поляризації світла на кут, який лінійно залежить від напруженості магнітного поля. Знак повертання площини поляризації світла при ефекті Фарадея не залежить від знаку хвильового вектора.

Кут повороту площини поляризації (Майкл Фарадей, 1845 рік):

$$\varphi = V H d \text{ [рад]}, \quad (186)$$

де H – напруженість зовнішнього магнітного поля [А/м], d – товщина зразка [м], V – постійна Верде [рад/А], залежна від природи речовини і довжини хвилі світла.

Теплове випромінювання – спільний процес конвекції і теплопровідності, при якій враховується температура всіх тіл, які мають температуру вище абсолютного нуля.

Тобто це електромагнітне випромінювання з безперервним спектром, що випускається нагрітими тілами за рахунок їх теплової енергії, це є свічення тіл, зумовлене нагріванням.

Залежно від температури тіла, що випромінює, теплове випромінювання може належати до різних діапазонів згідно із законом зміщення Віна, але синонімом даного терміну часто називають інфрачервоне випромінювання.

Характеристики теплового випромінювання (всі залежать від температури): енергетична світність тіла (інтегральна випромінювальна здатність); спектральна випромінювальна здатність; інтегральна поглинальна здатність; спектральна поглинальна здатність.

Відношення випромінювальної здатності до поглинальної здатності тіла не залежить від природи тіла, є функцією довжини хвилі тіла і температури.

Чим більше тіло поглинає певного (електромагнітного) випромінювання, тим більше воно випромінює тих самих хвиль при тій самій температурі.

Абсолютно чорне тіло (Густав Кірхгоф, 1862 рік) – фізична абстракція, що вживається у термодинаміці; тіло, яке цілком поглинає проміння (всіх довжин хвиль), що падає на нього. Не зважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випускати теплове випромінювання. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла визначається тільки його температурою.

Практичною моделлю чорного тіла може бути порожнина з невеликим отвором і зачорненими стінками, оскільки світло, що потрапляє крізь отвір в порожнину, зазнає багатократних віддзеркалень і сильно поглинається.

Глибокий чорний колір деяких матеріалів (деревного вугілля, чорного оксамиту) і зіниці людського ока пояснюється тим же механізмом.

Закон Кірхгофа (визначає співвідношення між випромінювальною та поглинальною здатностями тіл: відношення випромінювальної та поглинальної здатностей тіла не залежить від природи тіла і є універсальною для всіх тіл функцією частоти і температури):

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}, \quad (187)$$

де $r_{\nu,T}$ – універсальна функція Кірхгофа (спектральна щільність енергетичної світимості), $R_{\nu,T}$ – випромінювальна здатність тіла, $A_{\nu,T}$ – поглинальна здатність тіла.

Закон Стефана-Больцмана (енергетична світимість чорного тіла пропорційна четвертому ступеню термодинамічної температури):

$$R_e = \sigma T^4 \text{ [Вт/м}^2\text{]}, \quad (188)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)]}$ – постійна Стефана-Больцмана; T – термодинамічна температура [К].

Закон зміщення Віна (довжина хвилі λ_{max} , при якій випромінювальна здатність $r_{\lambda,T}$ чорного тіла максимальна, зворотно пропорційна його термодинамічній температурі):

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \text{ [м]}, \quad (189)$$

де λ_{max} – довжина хвилі [м] при якій випромінювальна здатність $r_{\nu,T}$ чорного тіла максимальна; $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ [мК]}$ — постійна Віна.

Фотоефект – явище «вибивання» світлом електронів із металів.

Це повне або часткове вивільнення електронів від зв'язків з ядрами атомів речовини внаслідок дії на неї електромагнітного проміння (світла, рентгенівського чи гамма-променів).

Розрізняють:

- зовнішній фотоефект – вибивання електронів під дією світла (фотоелектронна емісія), гамма-випромінювання тощо;
- внутрішній фотоефект – збільшення електропровідності напівпровідників або діелектриків під дією світла (фотопровідність);
- вентильний фотоефект – збудження світлом електрорушійної сили на межі між металом і напівпровідником або між різнорідними напівпровідниками (*p-n* перехід).

Дослідження фотоефекту дозволили сформулювати три його характерні закони:

- кількість фотоелектронів прямо пропорційна інтенсивності світла.
- максимальна кінетична енергія фотоелектронів не залежить від інтенсивності світла, кінетична енергія фотоелектронів прямо пропорційна частоті світла.
- для кожної речовини існують порогові значення частоти та довжини хвилі світла, які відповідають межі існування фотоефекту; світло з меншою частотою та більшою довжиною хвилі фотоефекту не викликає.

Оскільки це граничне значення завжди ближче до червоного світла, то йому дали назву червона межа фотоефекту.

Зрозуміло, що червона межа фотоефекту існує завдяки тяжінню електронів до ядер.

Разом з тим, останній закон не можна пояснити на основі уявлення про світло як неперервні плавні коливання у вакуумі-ефірі: такі хвилі мали довго розгойдувати електрони до того моменту, коли швидкість останніх стала б достатньою для відриву від металу.

Повне пояснення фотоефекту належить Альберту Ейнштейну, який використав ідею німецького фізика Макса Планка про те, що світло випромінюється і поширюється окремими порціями – квантами, які отримали назву фотонів.

Для обчислення енергії кванта світла Макс Планк запропонував просту формулу.

Енергія кванта світла (формула Планка):

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \text{ [Дж]}. \quad (190)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість світла; ν – частота хвилі світла [Гц]; λ – довжина хвилі світла [м]; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – стала Планка.

Енергія, маса та імпульс фотона:

$$\varepsilon_0 = h\nu \text{ [Дж]}; \quad m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2} \text{ [кг]}; \quad p_\gamma = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \text{ [кг·м/с]}. \quad (191)$$

У фотобіологічних дослідженнях часто енергію світла подають не для одного кванта, а для одного моля квантів:

$$1 \text{ ейнштейн} = N_A h\nu = N_A h \frac{c}{\lambda} \text{ [Дж/моль]}, \quad (192)$$

де $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро.

Ейнштейн висловив припущення, що фотоефект відбувається внаслідок поглинання фотоном одного кванта, а інші кванти не можуть брати участь у цьому процесі.

Тоді енергія одного кванта світла (фотона) витрачається на подолання бар'єру (виконання роботи виходу, відриву від матеріалу) і надання кінетичної енергії фотоелектрону.

Це дозволило йому записати закон збереження енергії для процесу:

рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$h\nu = A + \frac{m v_{\max}^2}{2}, \quad (193)$$

де A – робота виходу електрону [Дж], ν_0 , λ_0 – червона межа фотоефекту, що

визначається як:

$$\nu_0 = \frac{A}{h} [\text{Гц}], \lambda_0 = \frac{hc}{A} [\text{м}]. \quad (194)$$

Світловий тиск – тиск, який світло чинить на тіло, в якому поглинається, або від якого відбивається.

Світло складається з фотонів, кожен з яких має імпульс.

За законом збереження імпульсу при поглинанні фотона цей імпульс передається тілу, що його поглинуло.

При відбитті світла імпульс фотона змінюється на протилежний, а тіло, від якого відбивається світловий промінь, отримує вдвічі більший імпульс.

При відбитті світла поверхнею тіла світловий тиск вдвічі більший. При проходженні фотона наскрізь світлового тиску не виникає.

Тому в загальному випадку наведену формулу потрібно скоригувати з врахуванням цих процесів.

Тиск світла (Петро Миколайович Лебедєв, 1900 рік):

$$p = \frac{2h\nu}{c} \cdot \rho N + \frac{h\nu}{c} \cdot (1 - \rho) \cdot N = (1 + \rho) \cdot \frac{h\nu}{c} \cdot N [\text{Па}], \quad (195)$$

де ρ - коефіцієнт віддзеркалення світла, N – кількість фотонів, що падають за 1 с на 1 м^2 поверхні тіла.

5.2. Приклади розв'язання типових завдань

Приклад 24. Йонифорез застосовується для введення лікарських речовин в тіло людини.

Визначте кількість одноразово йонізованих йонів лікарської речовини, введених хворому за час $t = 10$ хв при щільності струму $j = 0,05 \text{ мА/см}^2$ з електроду площею $S = 5 \text{ см}^2$.

Дано: $j = 0,05 \text{ мА/см}^2 = 0,5 \text{ А/м}^2$; $S = 5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $t = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$.

Табличні величини, константи: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд електрона.

Знайти: N

Розв'язок:

Густина струму дорівнює:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{Ne}{St},$$

де I – сила струму; e – заряд електрона; N – число йонів.

Звідки число йонів $N = \frac{j \cdot S \cdot t}{e}$.

Підставивши чисельні дані, отримуємо:

$$N = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 9,4 \cdot 10^{17}.$$

Приклад 25. Для прогрівання м'язової тканини на плоскі електроди подається напруга $U = U_0 \sin \omega t$; з амплітудою $U_0 = 250$ В і частотою $\nu = 10^6$ Гц. Активний опір цієї ділянки ланцюгу $R = 10^3$ Ом; ємність $C = 5 \cdot 10^{-8}$ Ф.

Визначте кількість тепла, що виділилася в об'ємі тканини між електродами за період коливань T і за час процедури $t = 10$ хв.

Дано: $U_0 = 250$ В; $R = 10^3$ Ом; $\nu = 10^6$ Гц; $C = 5 \cdot 10^{-8}$ Ф; $t = 10$ хв = 600 с.

Знайти: Q_T, Q_t

Розв'язок:

Визначимо діюче значення струму в ланцюзі:

$$I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{Z} = \frac{U_{\text{д}}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_0/\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}}.$$

Підставивши чисельні дані, обчислимо:

$$I_{\text{д}} = \frac{250/\sqrt{2}}{\sqrt{1000^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-8}}\right)^2}} = 0,18 \text{ А.}$$

Період коливань дорівнює: $T = \frac{1}{\nu} = 10^{-6}$ с.

Тоді кількість теплоти, що виділилася за період коливань (144), становить:

$$Q_T = I^2 R T = (0,18)^2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 3,24 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Кількість теплоти, що виділилася за час t :

$$Q_t = I^2 R t = (0,18)^2 \cdot 10^3 \cdot 600 = 1,94 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Приклад 26. При знятті електрокардіограми в одному з електродів була отримана максимальна різниця потенціалів $\Delta\varphi = 1$ мВ. Обчисліть модуль електричного вектору серця D , якщо питомий електричний опір середовища $\rho = 15$ Ом·м, відстань від струмового генератора до вершин рівностороннього трикутника Ейнтховена $r = 0,2$ м.

Дано: $\rho = 15$ Ом·м; $r = 0,2$ м; $\Delta\varphi = 1$ мВ = 10^{-3} В.

Знайти: D

Розв'язок:

Різниця потенціалів між двома точками, що знаходяться на однаковій відстані r від диполя, дорівнює:

$$\Delta\varphi = \frac{\rho D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos\gamma}{2\pi r^2},$$

звідки:

$$D = \frac{2\pi r^2 \Delta\varphi}{\rho \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos\gamma}.$$

Різниця потенціалів залежить від кута γ між віссю диполя і віссю відведення і максимальна при їх паралельній орієнтації (рис. 13), а при $\gamma = 0$ ($\cos\gamma = 1$) (рис. 14).

Оскільки трикутник Ейнтховена рівносторонній, то $\beta = 60^\circ$.

Підставивши чисельні дані у формулу наведену вище, отримаємо:

$$D = \frac{2\pi(0,2)^2 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot \sin\left(\frac{60^\circ}{2}\right) \cdot \cos 0^\circ} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ А·м.}$$

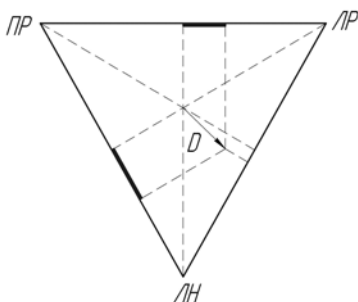


Рис. 13. Трикутник Ейнтховена:
 D – дипольний момент струмового генератора серця; ПР – права рука; ЛР – ліва рука; ЛН – ліва нога.

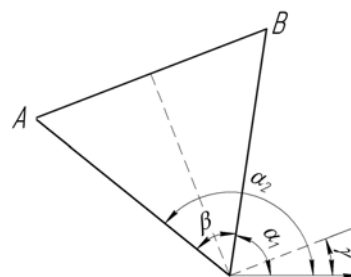


Рис. 14. Схема виводу формули для різниці потенціалів електричного поля диполя

Приклад 27. За скільки часу виділиться 10 Дж тепла в 0,2 мл розчину для ін'єкції внаслідок його підігрівання за рахунок індукції магнітного поля ($B_{ef} = 240$ мТл). Частота змінного магнітного поля $\nu = 1,12$ кГц. Вважати магнітне поле в даному об'ємі однорідним; значення коефіцієнта K_1 рівним одиниці; значення $\sigma = 1,8$ 1/Ом·м.

Дано: $B_{ef} = 240$ мТл = 0,24 Тл; $\nu = 1,12$ кГц = $1,12 \cdot 10^3$ Гц; $K_1 = 1$; $\sigma = 1,8$ 1/Ом·м; $Q = 10$ Дж; $V = 0,2$ мл = $2 \cdot 10^{-7}$ м³.

Знайти: t

Розв'язок:

Кількість тепла Q , що виділяється в об'ємі розчину для ін'єкції виражається формулою (150): $Q = K_1 \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot B_{ef}^2 \cdot V \cdot t$, де $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна частота.

Звідси:

$$t = \frac{Q}{K_1 \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot B_{ef}^2 \cdot V} = \frac{Q}{4\pi^2 \cdot K_1 \cdot \sigma \cdot \nu^2 \cdot B_{ef}^2 \cdot V}.$$

Підставивши чисельні дані, отримаємо:

$$t = \frac{10}{4\pi^2 \cdot 1 \cdot 1,8 \cdot 1,12^2 \cdot 0,24^2 \cdot 2 \cdot 10^{-7}} = 9,74 \text{ с.}$$

Приклад 28. Обчисліть енергію, що витрачається людиною щомиті при теплообміні з довкіллям. Розгляньте два випадки: 1) роздягнута людина; 2) людина, одягнена в костюм з вовняної тканини. Коефіцієнти поглинання: шкіри людини $k_1 = 0,9$; вовняної тканини $k_2 = 0,76$; температура поверхні шкіри $t_1 = 30^\circ\text{C}$; поверхні тканини $t_2 = 20^\circ\text{C}$ і навколишнього повітря $t_3 = 18^\circ\text{C}$. Площа поверхні, через яку здійснюється теплообмін променистою енергією з довкіллям, дорівнює $1,2$ м².

Дано: $k_1 = 0,9$; $k_2 = 0,76$; $t_1 = 30^\circ\text{C} = 303$ К; $t_2 = 20^\circ\text{C} = 293$ К; $t_3 = 18^\circ\text{C} = 291$ К; $S = 1,2$ м².

Табличні величини, константи: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ – стала Стефана-Больцмана.

Знайти: P_1, P_2

Розв'язок:

Тіло людини одночасно випромінює і поглинає випромінювання, що випускається довкіллям. Енергія, що втрачається людиною при теплообміні з довкіллям, дорівнює енергетичній світимості R , помноженій на площу поверхні, через яку здійснюється теплообмін (за формулою 188):

$$P = R \cdot S = \sigma \cdot k \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S,$$

де T_1, T_2 – температура людини і довкілля за шкалою Кельвіна.

Тоді, в першому випадку:

$$P_1 = \sigma \cdot k_1 \cdot (T_1^4 - T_3^4) \cdot S = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (303^4 - 291^4) \cdot 1,2 = 77 \text{ Вт.}$$

У другому випадку:

$$P_2 = \sigma \cdot k_2 \cdot (T_2^4 - T_3^4) \cdot S = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,76 \cdot (293^4 - 291^4) \cdot 1,2 = 10,3 \text{ Вт.}$$

Таким чином, роздягнена людина втрачає енергії приблизно в 7,5 разу більше за одягнену.

Приклад 29. У скільки разів зменшиться інтенсивність рентгенівських променів з довжиною хвилі $\lambda = 20$ пм при проходженні шару заліза завтовшки $x = 0,15$ мм? Масовий коефіцієнт поглинання заліза для цієї довжини хвилі $\mu_m = 1,1$ м²/кг.

Дано: $\lambda = 20$ пм = $2 \cdot 10^{-11}$ м; $x = 0,15$ мм = $1,5 \cdot 10^{-4}$ м; $D = 2$ см = 0,02 м.

Табличні величини, константи: $\mu_m = 1,1$ м²/кг – масовий коефіцієнт поглинання заліза; $\rho = 7900$ кг/м³ – густина заліза.

Знайти: I_0/I

Розв'язок:

Інтенсивність пучка рентгенівських променів, що пройшли через шар завтовшки x , визначається формулою:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x},$$

де μ – лінійний коефіцієнт поглинання: $\mu = \rho \mu_m$, де ρ – густина заліза.

Тоді зміна інтенсивності складе:

$$\frac{I_0}{I} = e^{\mu_m x} = \exp(7900 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}) = 3,7.$$

Тобто інтенсивність рентгенівських променів зменшиться в 3,7 разу.

Приклад 30. У тканинах масою 0,15 кг поглинулося $3 \cdot 10^{-5}$ Дж йонізуючого випромінювання протягом 20 с при постійній інтенсивності. Чому дорівнює поглинена доза і потужність дози?

Дано: $m = 0,15$ кг; $W_n = 3 \cdot 10^{-5}$ Дж; $t = 20$ с.

Знайти: D_n, P_n

Розв'язок:

Поглинена доза дорівнює (за формулою 160):

$$D_i = \frac{W_i}{m} = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{0,15} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гр},$$

де W_n – енергія йонізуючого випромінювання, поглинена масою m .

Потужність поглиненої дози дорівнює:

$$P_i = \frac{D_i}{t} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{20} = 10^{-5} \text{ Гр/с} = 10 \text{ мкГр/с}.$$

Приклад 31. Лазер працює на довжині хвилі $5 \cdot 10^{-7}$ м і випромінює пучок світла потужністю 0,1 Вт. Яку кількість фотонів випромінює лазер за 5 с?

Дано: $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м; $P = 0,1$ Вт; $t = 5$ с.

Табличні величини, константи: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі.

Знайти: n

Розв'язок:

Потужність світла: $P = \frac{\varepsilon}{t}$, звідки енергія фотона: $\varepsilon = P \cdot t$, але енергія фотонів:

$$\varepsilon = n \cdot \varepsilon_0 = n \cdot h\nu = n \cdot \frac{hc}{\lambda}.$$

Тоді $P \cdot t = n \cdot \frac{hc}{\lambda}$, звідки $n = \frac{P \cdot t \cdot \lambda}{hc} = \frac{0,1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,125 \cdot 10^{19}$.

Приклад 32. Визначити концентрацію розчину глюкози, якщо при проходженні світла через трубку довжиною $l = 20$ см площина поляризації повертається на кут $\varphi = 35,5^\circ$. Питоме обертання розчину глюкози $[\alpha] = 76,1$ град/дм на 1 г/см^3 концентрації.

Дано: $\varphi = 35,5^\circ$; $l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$; $[\alpha] = 76,1 \text{ град/дм} = 0,761 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$.

Знайти: C

Розв'язок:

Кут обертання площини поляризації оптично активної речовини знаходимо за формулою Біо (185): $\varphi = [\alpha] \cdot C \cdot l$.

Звідси, шукана концентрація:

$$C = \frac{\varphi}{[\alpha] \cdot l} = \frac{35,5}{0,761 \cdot 0,2} = 233,2 \text{ кг/м}^3.$$

5.3. Задачі для самостійного розв'язання

5.3.1. Організми в електричному та магнітному полях

151. Напруженість електричного поля змінюється за гармонічним законом. При якій частоті амплітуди значення густини струму провідності й зміщення в біологічних тканинах будуть рівними? Вважати, що електропровідність біологічних тканин $\delta = 10^{-5} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$, $\varepsilon = 100$.
152. Електрофорез застосовують для введення лікарських препаратів у біологічні тканини. Знайти масу йонів йоду, які введені хворому за 5 хв. при густині струму $j = 0,04 \text{ А/см}^2$ з електроду площею 4 см^2 .
153. Йонофорез застосовується для введення лікарських речовин в біологічні тканини. Визначити, яка кількість йонів йоду буде введена хворому за 10 хв при густині струму $0,05 \text{ А/см}^2$ з електроду площею 5 см^2 .
154. У скільки разів змінилася кількість виділеної теплоти при діатермії, якщо питомий опір тканин зменшився вдвічі, а прикладена до електродів напруга виросла в три рази?
155. На мембрані різниця потенціалів $u = 70 \text{ мВ}$. Знайти напруженість поля в мембрані, вважаючи його однорідним, та електроємність 1 см^2 мембрани. Товщина мембрани $d = 1 \text{ мм}$, відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 2$.

156. У скільки разів відрізняються кількості теплоти, яка виділяється при індуктотермії в крові та м'язовій тканині? Геометричні розміри ділянок вважати однаковими. Як зміниться кількість виділеної теплоти при збільшенні частоти магнітного поля у 8 разів?
157. У скільки разів зменшиться кількість теплоти, що виділяється в біологічній тканині при діатермії, якщо частота коливань вектора напруженості електричного поля зросла втричі, а питомий опір середовища зменшився у 5 разів, амплітудне значення напруженості поля зменшилося у 10 разів?
158. В першому відведенні максимальна різниця потенціалів 1 В спостерігається у випадку, коли електричний момент серця паралельний до відповідної сторони трикутника Ейнтховена. Оцініть величину електричного моменту серця $\varepsilon = 80?$ $r = 1$ м.
159. Еквівалентна до біологічних тканин електрична схема складається з двох паралельних віток, одна з яких має активний опір $R_1 = 2$ Ом, а друга - активний опір $R_2 = 4$ Ом і ємність $C = 12$ нФ. Знайти коефіцієнт дисперсії такої схеми, якщо $\nu_{н.ч} = 100$ Гц, $\nu_{в.ч} = 10^8$ Гц.
160. Який вигляд мала б кардіограма, якби електричний момент серця змінювався за законом $p = p_0 \cos \omega t$, а його орієнтація протягом кардіоциклу зберігалася б паралельною до однієї з сторін трикутника Ейнтховена. Побудуйте графік у трьох відведеннях.

5.3.2. Дія теплових полів на біологічні об'єкти

161. Визначити відносну кількість тепла, що виділяється в м'язовій тканині в порівнянні з жиром при мікрохвильовій терапії ($\nu = 2,15 \cdot 10^9$ Гц): $\varepsilon_{ж} = 5,5$; $\varepsilon_{м} = 47$; $\text{tg } \delta_{ж} = 0,21$; $\text{tg } \delta_{м} = 0,34$.
162. Скільки часу необхідно проводити УВЧ-терапію, щоб кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 жирової ($Q_{ж}$) тканини за рахунок струму провідності не перевищила 1 Дж. Вважати електричне поле в даному об'ємі однорідним ($E_{эф} = 198$ В/м); значення коефіцієнта K_2 рівним одиниці; $\sigma_{ж} = 0,035$ 1/Ом·м.

163. Визначити кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 м'язової (Q_m) тканини за рахунок струму провідності при УВЧ-терапії за час процедури 10 хв. Напруженість електричного поля між електродами терапевтичного контуру $E_{\text{еф}} = 194 \text{ В/м}$. Вважати поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках значення коефіцієнта K_2 прийняти рівним одиниці. Для м'язової тканини $\sigma_m = 0,690 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$.
164. Визначити кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 жирової ($Q_{\text{ж}}$) тканини за рахунок струму провідності при УВЧ-терапії за час процедури 15 хв. Напруженість електричного поля між електродами терапевтичного контуру $E_{\text{еф}} = 208 \text{ В/м}$. Вважати поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках значення коефіцієнта K_2 прийняти рівним одиниці. Для жирової тканини $\sigma_{\text{ж}} = 0,035 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$.
165. Визначити кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 м'язової тканини за 12 хв проведення процедури мікрохвильової терапії ($\nu = 2,45 \cdot 10^9 \text{ Гц}$). Напруженість електричного поля між електродами терапевтичного контуру $E_{\text{еф}} = 174 \text{ В/м}$. Вважати поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках значення коефіцієнта K_3 прийняти рівним одиниці; діелектрична проникність і тангенс кута витрат, відповідно: $\epsilon_m = 47$; $\text{tg } \delta_m = 0,34$.
166. Визначити кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 жирової тканини за 10 хв проведення процедури мікрохвильової терапії ($\nu = 1,97 \cdot 10^9 \text{ Гц}$). Напруженість електричного поля між електродами терапевтичного контуру $E_{\text{еф}} = 202 \text{ В/м}$. Вважати поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках значення коефіцієнта K_3 прийняти рівним одиниці; діелектрична проникність і тангенс кута витрат, відповідно: $\epsilon_{\text{ж}} = 5,5$; $\text{tg } \delta_{\text{ж}} = 0,21$.
167. Визначити відносну кількість тепла, що виділяється в м'язовій тканині в порівнянні з жировою при УВЧ-терапії. Для м'язової тканини $\sigma_m = 0,690 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$, а для жирової $\sigma_{\text{ж}} = 0,035 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$.

168. Яка кількість тепла виділиться в 1 мл розчину для електрофорезу за 5 хв, внаслідок дії магнітної індукції приладу при індукції магнітного поля, що виникає між електродами електрофорезу $B_{\text{ef}} = 120$ мТл. Частота змінного магнітного поля $\nu = 1,12 \cdot 10^7$ Гц. Вважати магнітне поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках взяти значення коефіцієнта K_1 рівним одиниці. Для електроліту взяти $\sigma = 1,8$ 1/Ом·м.
169. На скільки градусів нагріється 10 мл фізіологічного розчину за 10 хв при індукції магнітного поля $B_{\text{ef}} = 120$ мТл, частотою $\nu = 1,12 \cdot 10^7$ Гц. Вважати магнітне поле в даному об'ємі однорідним; при розрахунках взяти значення коефіцієнта K_1 рівним одиниці. Вважати властивості фізіологічного розчину близькими до властивостей дистильованої води. Прийняти $\sigma = 1400$ 1/Ом·м.
170. При якій частоті необхідно проводити процедуру мікрохвильової терапії, щоб кількість тепла, що виділяється в 1 см^3 м'язової тканини за 10 хв складала 10 Дж. Вважати електричне поле в даному об'ємі однорідним ($E_{\text{ef}} = 152$ В/м); значення коефіцієнта K_3 рівним одиниці; діелектричну проникність і тангенс кута витрат, відповідно: $\epsilon_m = 47$; $\text{tg } \delta_m = 0,34$.

5.3.3. Дія йонізуючого випромінювання на організми

171. Знайти товщину шару половинного послаблення алюмінію для рентгенівських променів деякої довжини хвилі, якщо відомо, що масовий коефіцієнт поглинання алюмінію для цієї довжини хвилі дорівнює $5,3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Густина алюмінію $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
172. Бетонна плита товщиною 20 см зменшує інтенсивність пучка γ -частинок кобальту в 16,5 разів. Визначити коефіцієнт лінійного послаблення і товщину шару половинного послаблення бетону.
173. Тіло масою $m = 60$ кг протягом 6 годин поглинуло енергію рентгенівського випромінювання $E = 1$ Дж. Знайти поглинуту дозу і потужність поглинутої дози в одиницях СІ і у позасистемних одиницях.

174. В $m = 10$ г тканини поглинається 10^9 α -частинок з енергією $E = 5$ МеВ. Знайти поглинуту і еквівалентну (біологічну) дози. Коефіцієнт якості k для альфа-частинок прийняти рівним 20.
175. Повітря, що знаходиться за нормальних умов в йонізаційній камері об'ємом 6 см³, опромінюється χ -променями. Потужність дози рентгенівських променів дорівнює $0,48$ мР/год. Знайти йонізаційний струм насичення.
176. Рентгенівська трубка створює на деякій відстані потужність дози $2,58 \cdot 10^5$ А/кг. Яке число пар йонів в одну секунду створює ця трубка в одному грамі повітря на даній відстані?
177. Чому дорівнює потік рентгенівського випромінювання, якщо анод виготовлений з вольфраму, а $U = 100$ кВ, $I = 0,7$ А?
178. Потужність експозиційної дози в рентгенівському кабінеті становить $6 \cdot 10^{12}$ Кл/кг с протягом 5 годин роботи. Знайти експозиційну дозу протягом 5-денного тижня та відповідні поглинуту і еквівалентну біологічні дози та їх потужності (в системних і позасистемних одиницях).
179. Рентгенівське (гальмівне) випромінювання виникає при бомбардуванні швидкими електронами металевого антикатада рентгенівської трубки. Визначити довжину хвилі короткохвильової межі спектра гальмівного випромінювання, якщо швидкість електронів дорівнює 40% від швидкості світла у вакуумі.
180. Електрон і позитрон, які утворені фотоном з енергією $h\nu = 5,7$ МеВ, дають в камері Вільсона, що вміщена в перпендикулярне магнітне поле, траєкторії з радіусом кривизни 3 см. Знайти магнітну індукцію поля.

5.3.4. Оптичні методи дослідження біологічних об'єктів

181. При освітленні тонкої плівки оливи білим світлом (довжина хвилі від 380 нм до 760 нм), різниця ходу для променів, що інтерферують, становить $\delta = 3 \cdot 10^{-6}$ м. Які кольори видно на плівці? Які довжини хвиль утворюють максимуми інтенсивності при інтерференції?

182. При проходженні світла через шар 6% розчину сахарози в кюветі довжиною 20 см площина поляризації обертається на кут $\varphi_1 = 14^\circ$. В розчині іншої концентрації сахарози при довжині кювети в 10 см площина поляризації обертається на кут $\varphi_2 = 6,8^\circ$. Яка концентрація сахарози другого розчину?
183. Перед лінзою з оптичною силою 2 діоптрії, перпендикулярно оптичній осі рухається предмет. Яку відстань проходить зображення предмета за 10 с, якщо він знаходиться на відстані 60 см від лінзи і рухається зі швидкістю 1 мм/с?
184. Чи можливо побачити елементи структури клітин листка рослини, якщо їх розміри 10^{-6} м, а характеристики оптичного мікроскопа є такими: $\lambda = 550$ нм; $m = 1$; об'єкт видно під кутом 90° ?
185. Порівняти величини роздільної відстані у мікроскопів, якщо імерсійне середовище: а) олія ($n_{олії} = 1,510$); б) вода ($n_{води} = 1,333$); с) повітря ($n_{повітря} = 1,002$).
186. Розчин глюкози з концентрацією 4,5 г на 100 см² є ізотонічним. Чи є ізотонічним розчин глюкози, який повертає площину поляризації світла в кюветі довжиною 1 дм на 5° ? Питомий кут обертання $[\alpha_0] = 52,8$ град·см/г·см³.
187. Розчин глюкози з концентрацією 0,28 г/см³ в кюветі довжиною 10 см, обертає площину поляризації світла, що проходить через кювету на кут $11,4^\circ$. Визначити питомий кут обертання для глюкози.
188. Коефіцієнт пропускання світла для розчину дорівнює 0,1. Чому дорівнює оптична густина розчину?
189. При проходженні світла через шар розчину товщиною 0,14 мм інтенсивність зменшилась на 63% від початкового значення. Знайти показник поглинання k для розчину.
190. Промінь світла виходить зі скляної призми рефрактометра у шар етилового спирту і розповсюджується на границі «скло-спирт». Під яким максимальним кутом падає світло на границю розподілу? Визначити

величину цього кута і яка його назва? (абсолютні показники заломлення скла та спирту, відповідно: $n_{\text{скла}} = 1,61$, $n_{\text{спирту}} = 1,36$).

5.4. Контрольні питання

1. Чим більш висока напруга прикладається до рентгенівської трубки, тим більш жорсткі промені випускає вона. Чому?
2. Чому для прогрівання використовується синя лампа (а не червона)?
3. Фізичний зміст лінійного коефіцієнта послаблення і товщина шару половинного послаблення. Значення цих характеристик в медицині.
4. Чим пояснити, що при штучному розширенні зіниці за допомогою ліків, око починає гірше розрізняти предмети?
5. Чому при дослідженні деяких біологічних структур в поляризованому світлі спостерігається чергування світлих та темних ділянок?
6. Природна і штучна радіоактивність. Формула закону радіоактивного розпаду та його тлумачення.
7. Види радіоактивного розпаду та їх характеристики.
8. Активність радіоактивного препарату та одиниці її вимірювання.
9. Радіоактивний фон та причини його виникнення.
10. Газорозрядні лічильники та їх основні характеристики.
11. Чому при глибинних опроміненнях організму на шляху рентгенівських променів ставлять фільтри?
12. Опромінення організму людини нейтронами є небезпечним, а ніж опромінення іншими видами випромінювань. Чому?
13. Закон послаблення радіоактивного випромінювання речовиною.
14. Крапнувши декілька крапель молока в склянку з водою, подивіться крізь неї на лампочку, що світиться. Лампочка здається червонувато-жовтою. Якщо ж подивитися на відбите від склянки світло, воно буде блакитним. Чому?
15. Чому при зменшенні напруги на лампі розжарювання світіння набуває червоний відтінок?
16. Чи може випромінювання будь-якого спектрального складу збудити фотолюмінесценцію цієї речовини?

6. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

6.1. Варіанти тестових завдань за розділами

6.1.1. Основи біомеханіки

1. При ізотонічному скороченні:

- А. довжина волокна змінюється, напруження постійне;
- Б. напруження змінюється, довжина волокна постійна;
- В. довжина і напруження незмінні;
- Г. довжина і напруження змінюються.

2. При ізометричному скороченні:

- А. довжина волокна змінюється, напруження постійне;
- Б. напруження змінюється, довжина волокна постійна;
- В. довжина і напруження незмінні;
- Г. довжина і напруження змінюються.

3. Рівняння Хілла має наступний вигляд:

А. $(P + a)(v + b) = (P_0 + a)b = a(v_{\max} + b)$;

Б. $(P + a)(v + b) = \frac{(P_0 - b)a}{b(v_{\max} - b)}$;

В. $(P + a) \frac{(v + b)}{a(v_{\max} - b)} = (P_0 + a)b$;

Г. $(P + a)(v + b) = \frac{(P_0 + b)a}{b(v_{\max} + b)}$;

Д. $(P + a)(v + b) = P_0 - ab = av_{\max}$.

4. Загальна потужність $N_{\text{заг}}$, що розвивається м'язом, дорівнює:

А. $N_{\text{заг}} = aP - b \frac{dQ}{dt}$;

Б. $N_{\text{заг}} = Pv - \frac{dQ}{dt}$;

В. $N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}} = (P - a)v = b\sqrt{P_0 + P}$;

Г. $N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}} = Pv + \frac{dQ}{dt}$;

Д. $N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}} = (P + a)v = b(P_0 - P)$.

5. ККД м'язів дорівнює:

А	$\eta = \frac{N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}}v}{P}$	Б	$\eta = \frac{PN_{\zeta\dot{a}\ddot{a}}}{v}$	В	$\eta = \frac{P^2v}{N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}}}$	Г	$\eta = \frac{Pv}{N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}}}$	Д	$\eta = \sqrt{\frac{N_{\zeta\dot{a}\ddot{a}}}{Pv}}$
---	--	---	--	---	--	---	--	---	---

6. Ідеальною рідиною називається:

- А. рідина, що складається з однорідних часток, що не деформуються;
- Б. рідина, молекули якої не взаємодіють між собою;
- В. рідина, течія якої підкоряється рівнянню Ньютона;
- Г. нестискувана рідина, що не має в'язкості;
- Д. рідина, коефіцієнт в'язкості якої не залежить від температури і тиску.

7. В'язкість рідин:

- А. зменшується з підвищенням температури і не залежить від тиску;
- Б. зменшується з підвищенням температури і збільшується з підвищенням тиску;
- В. збільшується з підвищенням тиску і не залежить від температури;
- Г. збільшується з підвищенням температури і зменшується з підвищенням тиску;
- Д. збільшується з підвищенням температури і тиску.

8. Сила Стокса дорівнює:

А	$F_c = \rho gV$	Б	$F_c = vS$	В	$F_c = 6\pi\eta Rv$	Г	$\hat{a}) F_c = \frac{4}{3}\rho v\eta$	Д	$F_c = \rho gh$
---	-----------------	---	------------	---	---------------------	---	--	---	-----------------

9. Турбулентною називається така течія рідини, при якій:

- А. за усім об'ємом потоку залишається постійний гідродинамічний тиск;
- Б. шари рідини ковзають один відносно одного, не змішуючись;
- В. усі частки рідини мають постійну швидкість;
- Г. відбувається інтенсивне перемішування між шарами рідини;
- Д. профіль середніх за часом швидкостей має параболічну форму.

10. Висота підняття (опускання) рідини в капілярі дорівнює:

А	$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$	Б	$h = \frac{\rho V l}{\eta}$	В	$h = 2\pi\sigma r R$	Г	$h = \frac{6\sigma\rho^2}{g r \cos \theta}$	Д	$h = \frac{\pi R^4}{8\eta l} \Delta p$
---	--	---	-----------------------------	---	----------------------	---	---	---	--

11. Робота, яку необхідно здійснити для збільшення площі поверхні рідини на величину ΔS , дорівнює:

А	$A = \rho\eta\Delta S$	Б	$A = \frac{\sigma}{\Delta S}$	В	$A = \sigma\Delta S$	Г	$A = \frac{\rho g}{\Delta S}$	Д	$A = \frac{\rho g}{\eta}$
---	------------------------	---	-------------------------------	---	----------------------	---	-------------------------------	---	---------------------------

12. Лінійне теплове розширення твердих тіл описується так:

А	$\Delta l = \frac{l_1\alpha}{\Delta t}$	Б	$\Delta l = \alpha\sqrt{l_1\Delta t}$	В	$\Delta l = \frac{\alpha}{l_1\Delta t}$	Г	$\Delta l = \alpha l_1\Delta t$	Д	$\Delta l = \frac{l_1^2}{\alpha\Delta t}$
---	---	---	---------------------------------------	---	---	---	---------------------------------	---	---

13. Відносна зміна товщини стержня при подовжньому розтягуванні дорівнює:

А	$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$	Б	$\frac{\Delta d}{d} = -\alpha\Delta l$	В	$\frac{\Delta d}{d} = \frac{F}{S}$	Г	$\frac{\Delta d}{d} = c m \Delta T$	Д	$\frac{\Delta d}{d} = E\varepsilon^2$
---	--	---	--	---	------------------------------------	---	-------------------------------------	---	---------------------------------------

14. Згідно із законом Гука, напруження σ , модуль Юнга E і відносна подовжня деформація ε пов'язані між собою наступним чином:

А	$\sigma = \sqrt{E \cdot \varepsilon}$	Б	$\sigma = \frac{E}{\varepsilon}$	В	$\sigma = \frac{E^2}{\varepsilon}$	Г	$\sigma = E \cdot \varepsilon^2$	Д	$\sigma = E \cdot \varepsilon$
---	---------------------------------------	---	----------------------------------	---	------------------------------------	---	----------------------------------	---	--------------------------------

15. Що розуміють під деформацією органу або тканини?

1. пристосування їх будови і функцій до певних умов існування організму;
2. природне або штучне відхилення їх форми від нормальної;

3. зміну розподілу температури на їх поверхні;
4. пристосування органу або тканини до зміни умов їхньої діяльності;
5. природна або штучна зміна їх розмірів.

А	1+2	Б	2+3	В	2+4	Г	2+5
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----

16. Як себе поводить пружно деформована біологічна тканина після зняття навантаження?

- А. повністю відновлює лише свою початкову форму;
- Б. повністю відновлює лише свої початкові розміри;
- В. повністю відновлює свої початкові розміри і форму;
- Г. частково відновлює свою початкову форму і розміри;
- Д. залишається у деформованому стані.

17. Деформації розтягу зазнають:

- А. хребці й диски хребта та кістки нижніх кінцівок;
- Б. кістки верхніх кінцівок, зв'язки, сухожилля, м'язи;
- В. щелепа під час жування;
- Г. шийні хребці при повороті голови, кисті рук при обертанні;
- Д. зуби під час жування.

18. У яких випадках у живих тканинах переважають пружні властивості?

- А. коли вони зазнають деформації стиску;
- Б. коли вони зазнають деформації розтягу;
- В. коли вони зазнають деформації зсуву;
- Г. при короткочасній дії сили;
- Д. при тривалій дії прикладених до них механічних сил.

19. Чим зумовлена дивовижна міцність кісток?

- А. їх формою (тавровий, трубчастий переріз);
- Б. наявністю органічних речовин;
- В. тим, що кістка ніколи не працює на злам, а тільки на стиск і розтяг;

- Г. особливістю їхньої будови (система тонких внутрішніх перемичок орієнтованих вздовж напрямку можливих механічних напружень);
- Д. великою площею поперечного перерізу.

20. Значення яких величин потрібно знати для визначення модуля Юнга кісткової тканини методом трьохточкового згину?

- А. товщину, ширину і довжину кістки, навантаження і стрілу прогину;
- Б. об'єм і масу кістки;
- В. товщину й ширину кістки, відстань від опори до точки прикладання навантаження, навантаження і стрілу прогину;
- Г. густину кістки, навантаження і стрілу прогину;
- Д. товщину й ширину кістки, відстань між опорами, навантаження і стрілу прогину.

21. Біомеханіка це:

- А. розділ біофізики, що вивчає механічні властивості живих тканин, органів і організму в цілому, а також механічні явища, що відбуваються в них.
- Б. розділ біофізики, що вивчає будову живого організму та особливості його функціонування
- В. розділ біофізики, що вивчає вплив навколишнього середовища на людський організм
- Г. розділ біофізики, що вивчає взаємодію живого організму з навколишнім середовищем

22. Опорно-руховий апарат людини складається із:

- А. скелету
- Б. з'єднаних між собою кісток скелету, до яких у певних точках кріпляться м'язи
- В. з'єднаних м'язами кісток
- Г. скелету і послідовно з'єднаних між собою груп м'язів

23. Важелем називають:

- А. тверде тіло з віссю обертання навколо якої постійно здійснюється його рух
- Б. тверде тіло, вісь обертання якого, можна переміщувати по всій його довжині
- В. тверде тіло, що може обертатися навколо будь-якої його точки
- Г. тверде тіло з нерухомою віссю обертання, на яке діє сила, що прагне обернути його навколо цієї вісі

24. В залежності від взаємного розташування, прикладених сил і точок опори важелі поділяються на:

1	сили	2	рівноваги	3	швидкості	4	стійкості
---	------	---	-----------	---	-----------	---	-----------

А	1+2	Б	2+3	В	1+3	Г	1+4
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----

25. Важіль швидкості в організмі людини представлений:

- А. черепом, що розглядається в сагітальній площині
- Б. кістками черепа
- В. кістками передпліччя
- Г. стопою

26. Що називають моментом сили важеля?

- А. добуток прикладеної сили на плече важеля
- Б. добуток прикладеної сили на силу реакції
- В. різницю між прикладеною силою і силою реакції
- Г. прикладену силу у даний момент часу

27. Які сили діють на елементи опорно-рухового апарату?

1	динамічні	2	знакозмінні	3	внутрішні	4	статистичні
---	-----------	---	-------------	---	-----------	---	-------------

А	1+2	Б	1+3	В	1+4	Г	2+3
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----

28. Якими фізичними параметрами не характеризуються пружні коливання:

А	частотою	Б	періодом	В	інтенсивністю	Г	довжиною хвилі	Д	амплітудою
---	----------	---	----------	---	---------------	---	----------------	---	------------

29. Яким фізичним параметром характеризується звукова хвиля:

А	частотою	Б	інтенсивністю	В	довжиною хвилі	Г	швидкістю
---	----------	---	---------------	---	----------------	---	-----------

30. Які ефекти використовуються для створення штучних ультразвукових коливань:

А	п'єзоефект	Б	термоелектричний ефект	В	магнітострикція	Г	ефект Пельтьє
---	------------	---	------------------------	---	-----------------	---	---------------

31. Яку дію на біологічні об'єкти має ультразвук:

А	теплову	Б	електричну	В	механічну	Г	хімічну
---	---------	---	------------	---	-----------	---	---------

32. Які діагностичні методи не відносяться до звукових:

1	фонокардіографія	2	електрокардіографія	3	реографія	4	аускультация	5	перкусія
---	------------------	---	---------------------	---	-----------	---	--------------	---	----------

А	1+2	Б	2+3	В	2+4	Г	2+5
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----

33. В якому середовищі не можуть поширюватися звукові коливання:

А	повітря	Б	вода	В	вакуум	Г	тверде тіло
---	---------	---	------	---	--------	---	-------------

34. Який спектр не може мати шум:

А	лінійчастий	Б	смугастий	В	суцільний
---	-------------	---	-----------	---	-----------

35. Який орган відноситься до внутрішнього вуха людини:

А	ковадло	Б	равлик	В	євстахієва труба	Г	стремінце
---	---------	---	--------	---	------------------	---	-----------

36. Чи сприймає людське вухо звук з частотою 1000 Гц та інтенсивністю 10^{-12} Вт/м²:

А	так	Б	ні	В	залежить від відстані до джерела звуку	Г	залежить від середовища
---	-----	---	----	---	--	---	-------------------------

37. При яких частотах людське вухо має найбільший інтервал сприйняття по інтенсивності:

А	100-500 Гц	Б	500-1000 Гц	В	1000-5000 Гц	Г	5000-10000 Гц
---	------------	---	-------------	---	--------------	---	---------------

38. Від чого залежить в'язкість крові у людини?

А	від віку	Б	від захворювання	В	від статі	Г	від стану життя
---	----------	---	------------------	---	-----------	---	-----------------

39. У нормі в'язкість крові людини дорівнює:

А	1,9 сПз	Б	2,2 сПз	В	4,5 сПз
---	---------	---	---------	---	---------

40. Методами визначення в'язкості рідин є:

1	метод відривання крапель	2	метод Стокса	3	метод Ребіндера	4	метод капілярної віскозиметрії
А	1+2	Б	2+3	В	2+4	Г	1+3

41. Яким є метод визначення коефіцієнта поверхневого натягу?

А	метод відривання крапель	Б	метод Стокса	В	метод Ребіндера	Г	метод капілярної віскозиметрії
---	--------------------------	---	--------------	---	-----------------	---	--------------------------------

42. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?

А	від роду рідини	Б	від температури	В	від тиску	Г	від форми поверхні
---	-----------------	---	-----------------	---	-----------	---	--------------------

43. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт поверхневого натягу?

А	$\text{Н} / \text{м}^2$	Б	$\text{Н} / \text{м}$	В	$\text{Н} \cdot \text{м}$	Г	$\text{Н} \cdot \text{м}^2$
---	-------------------------	---	-----------------------	---	---------------------------	---	-----------------------------

44. Агрегатним станом полімеру не є:

А	рідкий	Б	газоподібний	В	кристалічний	Г	частково-кристалічний
---	--------	---	--------------	---	--------------	---	-----------------------

45. Для молекули водню енергія Ван-дер-Ваальсовської взаємодії визначається тільки енергією:

А	Індукційної взаємодії	Б	Орієнтаційної взаємодії	В	Водневим зв'язком	Г	Дисперсійної взаємодії
---	-----------------------	---	-------------------------	---	-------------------	---	------------------------

46. Який порядок має енергії водневого зв'язку?

А	0,1 еВ	Б	10^{-23} Дж	В	10 еВ	Г	10^{-19} Дж
---	--------	---	---------------	---	-------	---	---------------

47. Який порядок мають сили Ван-дер-Ваальса?

А	$F \approx 1/r^6$	Б	$F \approx 1/r^{12}$	В	$F \approx 1/r^7$	Г	$F \approx r^7$
---	-------------------	---	----------------------	---	-------------------	---	-----------------

48. Агрегатний стан полімеру залежить від:

1	сили взаємодії ланок	2	хімічного складу	3	характеру взаємодії ланок
А	1+2	Б	1+3	В	2+3

49. При м'язовому скороченні:

1. нитки актину ковзають всередину саркомера уздовж міозину;
2. міозин стискається подібно до пружини;
3. містки прикріплюються до активних центрів актину;
4. містки розмикаються.

А	1+3	Б	2+4	В	2+3	Г	1+4
---	-----	---	-----	---	-----	---	-----

50. Число ланок молекули полімеру повинне задовольняти умові:

А	$N > 1$	Б	$N \gg 1$	В	$N \approx 1$
---	---------	---	-----------	---	---------------

6.1.2. Термодинаміка біологічних процесів та систем

1. Термодинамічна система, яка обмінюється з довкіллям речовиною і енергією, називається:

А	Ізольованою	Б	Закритою	В	Відкритою
---	-------------	---	----------	---	-----------

2. Закон Гесса вказує на те, що:

- А. Енергетичний підсумок процесу не залежить від шляху, а визначається початковим і кінцевим енергетичним станом системи
- Б. Енергетичний підсумок процесу визначається шляхом розвитку процесу, а не залежить від температури довкілля
- В. Енергетичний підсумок процесу визначається температурою середовища, що оточує його, а не залежить від шляху розвитку процесу

3. Під час генерації потенціалу дії проникність мембрани для йонів натрію:

- А. більша проникності для йонів калію;
- Б. менша проникності для йонів калію;
- В. приблизно дорівнює проникності для йонів калію.

4. Яка енергія може бути використана для здійснення роботи?

А	Вільна енергія	Б	Пов'язана енергія	В	Енергія, розсіяна у вигляді тепла
---	----------------	---	-------------------	---	-----------------------------------

5. В чому схожість між термодинамічною рівновагою та стаціонарним станом?

- А. Величинами вільної енергії та ентропії
- Б. Динамічними характеристиками термодинамічних функцій
- В. Можливістю системи самостійно здійснювати роботу

6. Функція стану - це термодинамічна функція, для якої правильне наступне твердження:

- А. Її зміна залежить лише від початкового і кінцевого станів системи.
- Б. Вона повністю характеризує стан системи.
- В. За допомогою неї можливо обчислити повний диференціал.

7. Функцією стану системи є:

А	Теплота	Б	Внутрішня енергія	В	Робота
---	---------	---	-------------------	---	--------

8. У експериментах Лавуазьє по прямій калориметрії потік теплоти визначався:

- А. По нагріванню зовнішньої стінки калориметра
- Б. За швидкістю випаровування води.
- В. За швидкістю танення льоду.

9. Метод непрямой калориметрії оснований:

- А. На обліку теплових еквівалентів поглинених харчових продуктів
- Б. На вимірі температури організму
- В. На вимірі теплоємності організму

10. Ентропія системи пов'язана з термодинамічною вірогідністю стану системи наступною формулою:

A	$S = RT \ln w$	Б	$S = k \ln w$	В	$S = k (1 + w)$
---	----------------	---	---------------	---	-----------------

11. Ентропія системи при протіканні безповоротного процесу:

A	Збільшується	Б	Не змінюється	В	Зменшується
---	--------------	---	---------------	---	-------------

12. Об'єднаний запис першого і другого законів термодинаміки виглядає таким чином:

A	$dU = dQ - TdS$	Б	$dU = dA - TdS$	В	$dU = dF - TdS$
---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------

13. Вільна енергія системи – це частина внутрішньої енергії, яка:

- A. Розсіюється у вигляді тепла
- Б. Витрачається на здійснення роботи
- В. Витрачається на підтримку стабільності системи

14. Пов'язана енергія системи – це частина внутрішньої енергії, яка:

- A. Розсіюється у вигляді тепла
- Б. Витрачається на здійснення роботи
- В. Витрачається на підтримку стабільності системи

15. Ентальпія відображає:

A	Швидкість продукції ентропії	Б	Тепловий вміст системи	В	Теплоємність системи
---	------------------------------	---	------------------------	---	----------------------

16. Ентальпія визначається при постійному:

A	Тиску	Б	Температурі	В	Об'ємі
---	-------	---	-------------	---	--------

17. Вкажіть правильний запис рівняння для ентальпії:

A	$dH = dQ + PdV$	Б	$dH = dU + VdP$	В	$dH = dU + PdV$
---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------

18. Вільна енергія Гельмгольца визначається при постійних:

A	Тиску і об'ємі	Б	Температурі і об'ємі	В	Температурі і тиску
---	----------------	---	----------------------	---	---------------------

19. Вкажіть правильний запис рівняння для вільної енергії Гельмгольца:

А	$dF = dQ - TdS$	Б	$dF = dU - PdS$	В	$dF = dU - TdS$
---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------

20. Вільна енергія Гіббса визначається при постійних:

А	Тиску і об'ємі	Б	Температурі і об'ємі	В	Температурі і тиску
---	----------------	---	----------------------	---	---------------------

21. Назвіть вірне формулювання другого закону термодинаміки:

- А. мимовільні процеси завжди супроводжуються збуванням ентропії;
- Б. ентропія відкритої системи або зменшується (у безповоротних процесах), або залишається незмінною (у оборотних процесах);
- В. ні за яких умов неможливе збільшення ентропії термодинамічної системи;
- Г. ентропія ізольованої системи або зростає (у безповоротних процесах), або залишається незмінною (у оборотних процесах);
- Д. усі приведені в пунктах (а-г) формулювання містять помилки або неточності.

22. Об'єднаний запис першого і другого законів термодинаміки (основне співвідношення термодинаміки) має вигляд:

А	$dS \geq T dQ$	Б	$T dS \geq dU + \delta A$	В	$dS \geq 0$	Г	$dS \leq T dQ$	Д	$dQ \leq dU + \delta A$
---	----------------	---	---------------------------	---	-------------	---	----------------	---	-------------------------

23. Термодинамічний потенціал Гіббса визначає корисну роботу процесу, що протікає при постійних значеннях:

А	об'єму і ентропії	Б	об'єму і температури	В	об'єму і тиску	Г	тиску і температури	Д	тиску і ентропії
---	-------------------	---	----------------------	---	----------------	---	---------------------	---	------------------

24. Внутрішня енергія реального газу залежить:

- А. від температури і об'єму;
- Б. тільки від температури;
- В. тільки від тиску;
- Г. тільки від об'єму;
- Д. тільки від температури при температурі нижчій за температуру інверсії; від температури і тиску при температурі вищій за температуру інверсії.

25. Критичним станом називається:

- А. стан з найбільшою температурою, при якій ще можлива зміна знаку ефекту Джоуля-Томсона;
- Б. стан, в якому відсутні відмінності між рідким і газоподібним станами речовини;
- В. стан, в якому три фази однієї і тієї ж речовини знаходяться в термодинамічній рівновазі;
- Г. стан пересиченої пари;
- Д. стан перегрітої рідини.

26. Потрійною точкою називається:

- А. стан з найбільшою температурою, при якій ще можлива зміна знаку ефекту Джоуля-Томсона;
- Б. стан, в якому відсутні відмінності між рідким і газоподібним станами речовини;
- В. стан, в якому три фази однієї і тієї ж речовини знаходяться в рівновазі;
- Г. стан пересиченої пари;
- Д. стан перегрітої рідини.

27. Сублімацією називається перехід:

- А. з газоподібного в рідкий стан;
- Б. з газоподібного в твердий стан;
- В. з рідкого в твердий кристалічний стан;
- Г. з рідкого в газоподібний стан;
- Д. з твердого кристалічного в газоподібний стан.

28. Щільністю потоку якої-небудь величини називається:

- А. кількість цієї величини, що переноситься за одиницю часу через одиницю площі поверхні;
- Б. кількість цієї величини, що переноситься за одиницю часу через деяку поверхню;

В. кількість цієї величини, що переноситься за деякий час через одиницю площі поверхні;

Г. кількість цієї величини в одиниці об'єму;

Д. кількість цієї величини в одиниці об'єму за нормальних умов.

29. Коефіцієнт дифузії газів визначається так:

А	$D = \sqrt{\frac{RT}{M}}$	Б	$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle$	В	$D = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$	Г	$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho$	Д	$D = \frac{3}{2} kT$
---	---------------------------	---	---	---	--------------------------------	---	--	---	----------------------

30. Рівняння Ньютона, що визначає силу в'язкого тертя між двома шарами газу або рідини, в одновимірному випадку має вигляд:

А	$F = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle$	Б	$F = ma$	В	$F_x = -\eta \frac{dv}{dx} S$	Г	$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$	Д	$F_x = \eta \frac{dv}{dx} t$
---	---	---	----------	---	-------------------------------	---	--	---	------------------------------

31. Система знаходиться в стаціонарному стані. При цьому:

А. термодинамічні параметри постійні в часі і однакові в усіх частинах системи, система є відкритою або закритою;

Б. термодинамічні параметри не змінюються в часі, але можуть відрізнятися в різних частинах системи, система ізольована;

В. система не змінюється в часі, в ній підтримуються сталі градієнти параметрів, система є відкритою або закритою;

Г. термодинамічні параметри постійні в часі і однакові в усіх частинах системи, система ізольована;

Д. термодинамічні параметри змінюються в часі, система є відкритою.

32. Міра впорядкованості відкритої системи збільшується $\left(\frac{dS}{dt} < 0\right)$, якщо виконується наступне:

А	$\frac{d_e S}{dt} < 0$ $\left \frac{d_e S}{dt}\right > \frac{d_i S}{dt}$	Б	$\frac{d_e S}{dt} > 0$	В	$\frac{d_e S}{dt} < 0$ $\left \frac{d_e S}{dt}\right < \frac{d_i S}{dt}$	Г	$\frac{d_e S}{dt} = 0$	Д	$\frac{d_e S}{dt} < 0$ $\left \frac{d_e S}{dt}\right = \frac{d_i S}{dt}$
---	--	---	------------------------	---	--	---	------------------------	---	--

33. Осмотична робота, що здійснюється системою при зміні концентрації від c_1 до c_2 , складає:

А	$zF(c_2 - c_1)$	Б	$PV(c_2 - c_1)$	В	$RT(c_2 - c_1)$	Г	$pV \frac{c_2}{c_1}$	Д	$RT \ln \frac{c_2}{c_1}$
---	-----------------	---	-----------------	---	-----------------	---	----------------------	---	--------------------------

34. Електрична робота, що здійснюється системою при перенесенні речовини з області з електричним потенціалом φ_1 , в область з потенціалом φ_2 , складає:

А	$zF(\varphi_2 - \varphi_1)$	Б	$RT \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$	В	$PV(\varphi_2 - \varphi_1)$	Г	$RT \ln(\varphi_2 - \varphi_1)$	Д	$PV \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$
---	-----------------------------	---	--------------------------------------	---	-----------------------------	---	---------------------------------	---	----------------------------------

35. Електрохімічний потенціал i -тої компоненти системи рівний:

А. $\tilde{\mu}_i = H_i - TS_i$;

Б. $\tilde{\mu}_i = -RT \ln K_i$;

В. $\tilde{\mu}_i = \mu_{0i} + RT \ln c_i + zF\varphi_i$;

Г. $\tilde{\mu}_i = U_i - pV_i + TS_i$;

Д. $\tilde{\mu}_i = \sum J_i X_i$.

36. Згідно з теоремою Пригожина, в стаціонарному стані при фіксованих зовнішніх параметрах швидкість продукції ентропії відкритої системи:

А. необмежено зростає;

Б. приймає постійне, відмінне від нуля позитивне значення;

В. необмежено убыває;

Г. набуває мінімального значення;

Д. дорівнює нулю.

37. Стаціонарний стан є стійким, якщо відхилення від нього приводить:

А. до зростання внутрішньої енергії системи;

Б. зниженню внутрішньої енергії системи;

В. збільшенню дисипативної функції;

Г. зниженню дисипативної функції;

Д. в приведених пунктах правильної відповіді немає.

38. Мембранний потенціал спокою...

А	$\varphi_M = \varphi_e - \varphi_i$	Б	$\varphi_M = \varphi_i - \varphi_e$	В	$\varphi_M = \varphi_e + \varphi_i$
---	-------------------------------------	---	-------------------------------------	---	-------------------------------------

39. Потенціал спокою визначається...

А. лише різною концентрацією йонів по різні сторони мембрани;

Б. лише дифузією йонів крізь мембрану;

В. різною концентрацією йонів по різні сторони мембрани і дифузією йонів крізь мембрану;

Г. дифузією нейтральних частинок крізь мембрану;

Д. лише активним транспортом йонів.

40. У спокої потенціал нервової клітини наближається до рівноважного:

А	кальцієвого потенціалу	Б	натрієвого потенціалу	В	хлорного потенціалу	Г	калієвого потенціалу	Д	потенціалу протонів
---	------------------------	---	-----------------------	---	---------------------	---	----------------------	---	---------------------

41. Потенціал, який виникає на мембрані, яка проникна для малих йонів різних знаків (Na^+ , K^+ , Cl^- та ін.) та непроникна для великих заряджених молекул (наприклад, білків, нуклеїнових кислот й інших великих органічних йонів), розташованих всередині клітинного простору називається...

А	потенціалом спокою	Б	дифузним	В	стаціонарним	Г	доннанівським	Д	потенціалом дії
---	--------------------	---	----------	---	--------------	---	---------------	---	-----------------

42. Різниця потенціалів, що виникає при збудженні клітини і зумовлена зміною проникності мембрани для йонів називається ...

А	потенціалом спокою	Б	натрієвим потенціалом	В	хлорним потенціалом	Г	калієвим потенціалом	Д	потенціалом дії
---	--------------------	---	-----------------------	---	---------------------	---	----------------------	---	-----------------

43. Під час генерації потенціалу дії потенціал нервової клітки наближається до рівноважного:

А	кальцієвого потенціалу	Б	натрієвого потенціалу	В	хлорного потенціалу	Г	калієвого потенціалу	Д	потенціалу протонів
---	------------------------	---	-----------------------	---	---------------------	---	----------------------	---	---------------------

44. Внутрішньоклітинне середовище заряджене в порівнянні з позаклітинним:

А. у спокої – негативно, на максимумі потенціалу дії – позитивно;

Б. у спокої – позитивно, на максимумі потенціалу дії – негативно;

В. завжди позитивно;

Г. завжди негативно.

45. Проникність мембрани для йонів калію в спокої:

А. значно більша проникності для йонів натрію;

Б. значно менше проникності для йонів натрію;

В. приблизно дорівнює проникності для йонів натрію.

46. Під час генерації потенціалу дії проникність мембрани для йонів калію:

А. більша проникності для йонів натрію;

Б. менша проникності для йонів натрію;

В. приблизно дорівнює проникності для йонів натрію.

47. Збільшення трансмембранної різниці потенціалів називається ..., зменшення

А. деполяризацією; гіперполяризацією;

Б. гіперполяризацією; деполяризацією;

В. реполяризацією; деполяризацією;

Г. деполяризацією; реполяризацією;

Д. рефрактерністю; реполяризацією.

48. Постійною довжини нервового волокна називається відстань, на якій:

А. швидкість поширення нервового імпульсу зменшується в e разів;

Б. швидкість поширення нервового імпульсу збільшується в e разів;

В. швидкість поширення нервового імпульсу зменшується в 10 разів;

Г. швидкість поширення нервового імпульсу збільшується в 10 разів;

Д. потенціал зменшується в e разів.

49. Швидкість поширення нервового імпульсу пропорційний (D – діаметр волокна):

- А. \sqrt{D} для немієлінованих і мієлінізованих нервових волокон;
- Б. D для немієлінізованих і мієлінізованих нервових волокон;
- В. \sqrt{D} для немієлінізованих і D для мієлінізованих нервових волокон;
- Г. D для немієлінізованих і \sqrt{D} для мієлінізованих нервових волокон;
- Д. D^2 для немієлінізованих і мієлінізованих нервових волокон.

50. В процесі біохімічних реакцій ферменти:

- А. прискорюють реакції і самі при цьому не змінюються
- Б. прискорюють реакції і змінюються
- В. в результаті реакції уповільнюють хімічні реакції, при цьому самі не змінюються
- Г. уповільнюють хімічні реакції, змінюючись

6.1.3. Молекулярна біофізика

1. Енергія ван-дер-ваальсового тяжіння зворотно пропорційна (r – відстань між атомами):

А	r	Б	r^2	В	r^6	Г	r^8	Д	r^{12}
---	-----	---	-------	---	-------	---	-------	---	----------

2. Координаційне число води в структурі льоду складає:

А	1	Б	2	В	3	Г	4	Д	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

3. Координаційне число води в рідкому стані складає приблизно:

А	2,3	Б	3	В	4	Г	4,4	Д	5,7
---	-----	---	---	---	---	---	-----	---	-----

4. При утворенні впорядкованої структури води:

А	$\Delta S < 0$	Б	$\Delta S > 0$	В	$\Delta S > 0$	Г	$\Delta S < 0$	Д	$\Delta S < 0$
	$\Delta H < 0$		$\Delta H > 0$		$\Delta H < 0$		$\Delta H > 0$		$\Delta H > 0$
	$\Delta G < 0$		$\Delta G > 0$		$\Delta G > 0$		$\Delta G < 0$		$\Delta G > 0$

5. При розчиненні у воді гідрофобного з'єднання:

А	$\Delta S > 0$ $\Delta H > 0$ $\Delta G < 0$	Б	$\Delta S > 0$ $\Delta H > 0$ $\Delta G > 0$	В	$\Delta S < 0$ $\Delta H < 0$ $\Delta G < 0$	Г	$\Delta S < 0$ $\Delta H > 0$ $\Delta G < 0$	Д	$\Delta S < 0$ $\Delta H < 0$ $\Delta G > 0$
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

6. Залежність енергії молекул, що мають осьову симетрію C_3 , від кута повороту приблизно визначається формулою:

А. $U = 1/2U_0(1 - \sin 3\varphi)$;

Б. $U = 1/2U_0(1 - \cos 3\varphi)$;

В. $U = 1/3U_0(1 + \sin 2\varphi)$;

Г. $U = 1/3U_0(1 + \cos 3\varphi)$;

Д. $U = 1/4U_0(1 - \cos 2\varphi)$

7. У білках ковалентними зв'язками стабілізовані переважно:

А. тільки первинна структура;

Б. первинна і вторинна структури;

В. первинна, вторинна і третинна структури;

Г. тільки четв'єртинна структура;

Д. усі типи організації білку.

8. Якщо у білку відношення числа полярних залишків до неполярних (b) перевищує відношення об'єму гідрофільної фази до об'єму гідрофобного ядра ($b_{\text{я}}$), то глобула прагнуче:

А. набути сферичної форми;

Б. набути витягнутої форми;

В. утворити надмолекулярну структуру;

Г. правильна відповідь не приведена.

9. Дія ферментів зводиться:

А. до збільшення вільної енергії кінцевого продукту;

Б. до зменшення вільної енергії кінцевого продукту;

- В. до збільшення енергії активації каталізованої реакції;
- Г. до зменшення енергії активації каталізованої реакції;
- Д. до зміни хімічної рівноваги в реакціях.

10. Рівняння Міхаеліса-Метен має вигляд:

$$\begin{array}{lll}
 \text{А. } v = \frac{v_{\max} + [S]}{k_m [S]}; & \text{Б. } v = \frac{k_m + [S]}{v_{\max}}; & \text{В. } v = \frac{v_{\max}}{k_m + [S]v_{\max}}; \\
 \text{Г. } v = \frac{v_{\max}}{k_m + [S]^2}; & \text{Д. } v = \frac{v_{\max} [S]}{k_m + [S]} &
 \end{array}$$

11. У присутності конкурентного інгібітору:

- А. швидкість реакції не змінюється;
- Б. швидкість реакції збільшується;
- В. максимальна швидкість реакції не змінюється;
- Г. максимальна швидкість реакції зменшується;
- Д. максимальна швидкість реакції збільшується.

12. У присутності неконкурентного інгібітору:

- А. швидкість реакції не змінюється;
- Б. швидкість реакції збільшується;
- В. максимальна швидкість реакції не змінюється;
- Г. максимальна швидкість реакції зменшується;
- Д. максимальна швидкість реакції збільшується..

13. Товщина біологічних мембран складає порядку:

А	0,01 нм	Б	0,1 нм	В	10 нм	Г	100 нм	Д	1 мкм
---	---------	---	--------	---	-------	---	--------	---	-------

14. Згідно рідинно-мозаїчної моделі, біологічна мембрана складається з:

- А. біліпідного шару;
- Б. двох шарів ліпідів з білковим шаром між ними;
- В. двох шарів ліпідів, оточених згори і знизу двома суцільними білковими шарами;

- Г. біліпідного шару, білків і мікрофіламентів;
 Д. шару ліпідів з вкрапленнями білків і вуглеводів.

15. Латеральною дифузією називається дифузія:

- А. молекул з одного ліпідного шару в інший;
 Б. молекул через біологічну мембрану;
 В. молекул в мембрані в межах одного шару;
 Г. білкових молекул з одного ліпідного шару в інший;
 Д. йонів через бішарову мембрану.

16. Перехід молекул з одного ліпідного шару в інший називається:

- А. "фліп-флоп" – переходом;
 Б. полегшеною дифузією;
 В. активним транспортом;
 Г. латеральною дифузією;
 Д. пасивним транспортом.

17. Час осілого життя молекули в одному положенні складає:

А	$\tau = \frac{A}{\sqrt{6D}}$	Б	$\tau = \frac{A}{2\sqrt{3D}}$	В	$\tau = \frac{D}{2\sqrt{3A}}$	Г	$\tau = \frac{D}{\sqrt{6A}}$	Д	$\tau = \frac{\sqrt{A}}{2D}$
---	------------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------------	---	------------------------------	---	------------------------------

18. Середнє квадратичне переміщення молекул за час t складає:

- А. $S_{\bar{n}\bar{d}.éâ} = 2t\sqrt{Dt}$;
 Б. $S_{\bar{n}\bar{d}.éâ} = 3D\sqrt{t}$;
 В. $S_{\bar{n}\bar{d}.éâ} = 3\sqrt{Dt}$;
 Г. $S_{\bar{n}\bar{d}.éâ} = 2\sqrt{Dt}$;
 Д. $S_{\bar{n}\bar{d}.éâ} = 2t\sqrt{t}$.

19. Ліпосомами називаються:

- А. мономолекулярні шари на межі розділу гідрофобної та гідрофільної фаз;

- Б. плоскі бішарові ліпідні мембрани;
- В. біліпідні замкнуті структури;
- Г. шари ліпідів і білків, нанесені на поверхню води;
- Д. те ж саме, що і міцели.

20. Ліпіди у складі біологічних мембран знаходяться в:

- А. твердому аморфному стані;
- Б. твердокристалічному стані;
- В. рідкому аморфному стані;
- Г. рідкокристалічному стані;
- Д. правильна відповідь не приведена.

21. При фазовому переході мембран з рідкокристалічного в стан гелю площа мембрани, що приходить на одну молекулу ліпиду:

А	зменшується	Б	збільшується	В	не змінюється
---	-------------	---	--------------	---	---------------

22. Чим більше в "хвостах" ліпідів подвійних зв'язків, тим температура фазового переходу:

А	вища	Б	нижча	В	не залежить від цього
---	------	---	-------	---	-----------------------

23. Температура плавлення мембрани пов'язана зі зміною ентальпії та ентропії в цьому процесі таким чином:

А	$T_{ie} = \frac{\Delta H}{\Delta S}$	Б	$T_{ie} = \sqrt{\frac{\Delta H}{\Delta S}}$	В	$T_{ie} = \frac{\Delta S}{\Delta H}$	Г	$T_{ie} = \sqrt{\frac{\Delta S}{\Delta H}}$	Д	$T_{ie} = \left(\frac{\Delta S}{\Delta H}\right)^2$
---	--------------------------------------	---	---	---	--------------------------------------	---	---	---	---

24. Коефіцієнт проникності мембрани описується наступним виразом:

А	$P = \frac{D^2 K}{l}$	Б	$P = \frac{lK}{D^2}$	В	$P = \frac{l}{DK}$	Г	$P = \frac{\sqrt{DK}}{l}$	Д	$P = \frac{DK}{l}$
---	-----------------------	---	----------------------	---	--------------------	---	---------------------------	---	--------------------

25. Закон Фіка для пасивного транспорту речовин через мембрану має вигляд:

А	$J = -P(c_2 - c_1)$	Б	$J = P(c_2 + c_1)$	В	$J = -D(c_2 - c_1)$	Г	$J = D(c_2 + c_1)$	Д	$J = -P(c_2 + c_1)$
---	---------------------	---	--------------------	---	---------------------	---	--------------------	---	---------------------

26. Електродифузійне рівняння Нернста-Планка має вигляд:

$$A. J = -uRT \frac{dc}{dx} - cuzF \frac{d\phi}{dx};$$

$$B. J = -u^2 RF \frac{dc}{dt} - czT \frac{d\phi}{dt};$$

$$B. J = -D \frac{dc}{dt};$$

$$Г. J = -uzF \frac{d\phi}{dx} - cuRT \frac{dc}{dt};$$

$$Д. J = -cu \frac{dc}{dx}.$$

27. Рівняння Гольдмана має вигляд:

$$A. J = \frac{zF\Delta\phi}{RT} \cdot \frac{c_2 \exp \frac{zF\Delta\phi}{RT} + c_1}{1 + \exp \frac{zF\Delta\phi}{RT}};$$

$$B. J = -D \frac{dc}{dx};$$

$$B. J = -cu \cdot \frac{d\tilde{\mu}}{dx};$$

$$Г. \frac{c_2 \exp \frac{zF\Delta\phi}{RT} - c_1}{1 - \exp \frac{zF\Delta\phi}{RT}};$$

$$Д. J = \frac{z\Delta\phi P}{RT} \cdot \frac{c_1}{1 - \exp \frac{zF\Delta\phi}{RT}}.$$

28. Рівняння Нернста має вигляд:

$$A. \phi_i - \phi_0 = \frac{zF}{RT} \ln \frac{c_0}{c_i};$$

$$B. \phi_i - \phi_0 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_0}{c_i};$$

$$B. \phi_i - \phi_0 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i}{c_0};$$

$$Г. \phi_i - \phi_0 = \frac{zR}{TF} \ln \frac{c_0}{c_i};$$

$$Д. \phi_i - \phi_0 = \frac{zR}{TF} \ln \frac{c_i}{c_0}.$$

29. Потенціал Донана дорівнює:

$$A. \phi_i - \phi_0 = -\frac{RT}{F} \ln c;$$

$$B. \phi_i - \phi_0 = -RT \ln \frac{c_i}{c_0};$$

$$B. \phi_i - \phi_0 = -\frac{RT}{F} \frac{n[R^-]_i}{2c};$$

$$Г. \phi_i - \phi_0 = \frac{RT}{F} \Delta c;$$

$$Д. \phi_i - \phi_0 = \frac{F}{RT} cn.$$

30. В порівнянні з простою дифузією полегшена дифузія:

А. відбувається з меншою швидкістю;

Б. відбувається з більшою швидкістю;

В. супроводжується зміною швидкості транспорту, але не по модулю, а по напрямку;

Г. не супроводжується зміною швидкості транспорту.

31. Na^+ , K^+ - насос транспортує в клітину:

А. 2Na^+ , а з клітини 3K^+ ;

Б. 2K^+ , а з клітини 3Na^+ ;

В. 3K^+ , а з клітини 2Na^+ ;

Г. 3Na^+ , а з клітини 2K^+ ;

Д. 3Na^+ , а з клітини 3K^+

32. Молекула валіноміцина транспортує через мембрану:

А	K^+ та Na^+	Б	переважно Na^+	В	переважно K^+	Г	K^+ та Ca^{2+}	Д	H^+ та Cl^-
---	-------------------------------	---	-------------------------	---	------------------------	---	----------------------------------	---	-------------------------------

33. Рівноважний мембранний потенціал для йонів натрію

А. $\Delta\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Na}]_i}{[\text{Na}]_0}$;

Б. $\Delta\phi = \frac{F}{RT} \ln \frac{[\text{Na}]_i}{[\text{Na}]_0}$;

В. $\Delta\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Na}]_0}{[\text{Na}]_i}$;

Г. $\Delta\phi = \frac{F}{RT} \ln \frac{[\text{Na}]_0}{[\text{Na}]_i}$;

Д. $\Delta\phi = \frac{FT}{R} \ln \frac{[\text{Na}]_0}{[\text{Na}]_i}$.

34. Рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца має наступний вигляд:

А. $\Delta\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [\text{K}^+]_i}{P_K [\text{K}^+]_0}$;

Б. $\Delta\phi = \frac{RT}{F} \exp \frac{P_K [\text{K}^+]_0 + P_{\text{Na}} [\text{Na}^+]_0 + P_{\text{Cl}} [\text{Cl}^-]_0}{P_K [\text{K}^+]_i + P_{\text{Na}} [\text{Na}^+]_i + P_{\text{Cl}} [\text{Cl}^-]_i}$;

В. $\Delta\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Na}^+]_i}{[\text{Na}^+]_0}$;

40. Постійною довжини нервового волокна називається відстань, на якій:

- А. швидкість поширення нервового імпульсу зменшується в e разів;
- Б. швидкість поширення нервового імпульсу збільшується в e разів;
- В. швидкість поширення нервового імпульсу зменшується в 10 разів;
- Г. швидкість поширення нервового імпульсу збільшується в 10 разів;
- Д. потенціал зменшується в e разів.

41. Потенціал електричного поля диполя складає:

А	$\varphi = \frac{4\pi\rho I}{r}$	Б	$\varphi = \frac{4\pi r}{\rho I}$	В	$\varphi = \frac{4\rho}{\pi r}$	Г	$\varphi = \frac{\rho I}{4\pi r}$	Д	$\varphi = \frac{\rho}{4\pi I r}$
---	----------------------------------	---	-----------------------------------	---	---------------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------------

42. Інфрачервоне випромінювання проникає назовні з глибини тіла не більше, ніж на:

А	1 нм	Б	1 мкм	В	0,1 мм	Г	1 см	Д	1 м
---	------	---	-------	---	--------	---	------	---	-----

43. НВЧ-випромінювання проникає назовні з глибини тіла не більше, ніж на:

А	1 нм	Б	1 мкм	В	0,1 мм	Г	1 см	Д	1 м
---	------	---	-------	---	--------	---	------	---	-----

44. Хемілюмінесценція виникає у тому випадку, якщо в ході реакції утворюються:

- А. циклічні з'єднання;
- Б. продукти в електронно-збудженому стані;
- В. з'єднання, що містять макроергічні зв'язки;
- Г. з'єднання, що містять зв'язані подвійні зв'язки;
- Д. йони.

45. Квантовим виходом хемілюмінесценції називається:

- А. відношення числа випущених фотонів до числа молекул, що прореагували;
- Б. відношення числа поглинутих фотонів до числа прореагувавших молекул;
- В. те ж саме, що й швидкість реакції;
- Г. величина, яка чисельно дорівнює квадратному кореню з інтенсивності

люмінесценції;

Д. коефіцієнт пропорційності між швидкістю реакції та концентрацією реагуючої речовини.

46. Рідко-мозаїчна модель біологічної мембрани включає в себе:

А. білковий шар, полісахариди і поверхневі ліпіди;

Б. ліпідний моношар і холестерин;

В. ліпідний біошар, білки, мікрофіламенти;

Г. ліпідний біошар.

47. Згідно рідко-мозаїчної моделі, біологічна мембрана складається:

А. з ліпідного шару;

Б. двох шарів ліпідів з білковим шаром між ними;

В. двох шарів ліпідів, оточених зверху і знизу двома суцільними білковими шарами;

Г. біліпідного шару, білків і мікроелементів;

Д. шару ліпідів із вкрапленнями білків і вуглеводів.

48. Латеральною дифузією називається дифузія:

А. молекул з одного ліпідного шару в інший;

Б. молекул через біологічну мембрану;

В. молекул у мембрані у межах одного шару;

Г. білкових молекул із одного ліпідного шару в інший;

Д. йонів через двошарову мембрану.

49. Перехід молекули з одного ліпідного шару в інший називається:

А. «фліп-флоп»-переходом;

Б. полегшеною дифузією;

В. активним транспортом;

Г. латеральною дифузією;

Д. пасивним транспортом.

50. Амплітуда потенціалу дії визначається як:

А	$\varphi_i^{\ddot{a}} = \varphi_i^n + \varphi_i^{\delta\ddot{a}\ddot{a}}$	Б	$\varphi_i^{\ddot{a}} = \varphi_i^n - \varphi_i^{\delta\ddot{a}\ddot{a}}$	В	$\varphi_i^{\ddot{a}} = \varphi_i^{\delta\ddot{a}\ddot{a}} - \varphi_i^n $
---	---	---	---	---	---

6.1.4. Біофізика складних біологічних систем

1. Модель "хижак-жертва" описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\text{А. } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 y + \gamma_1 xy \\ \frac{dy}{dt} = \gamma_2 xy + \varepsilon_2 y \end{cases}; \quad \text{Б. } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 y - \gamma_1 \sqrt{xy} \\ \frac{dy}{dt} = \gamma_2 \sqrt{xy} - \varepsilon_2 x \end{cases};$$

$$\text{В. } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \gamma_1 xy \\ \frac{dy}{dt} = -\gamma_2 xy \end{cases}; \quad \text{Г. } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 y^2 - \gamma_1 x^2 \\ \frac{dy}{dt} = \gamma_2 x^2 - \varepsilon_2 y^2 \end{cases};$$

$$\text{Д. } \begin{cases} \frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 x - \gamma_1 xy \\ \frac{dy}{dt} = \gamma_2 xy - \varepsilon_2 y \end{cases}.$$

2. Зміна концентрації препарату в крові у разі однократного введення описується рівнянням:

$$\text{А. } c(t) = c_0 + e^{-k_{el}t}; \quad \text{Б. } c(t) = c_0 \cdot e^{k_{el}t}; \quad \text{В. } c(t) = c_0 - e^{k_{el}t};$$

$$\text{Г. } c(t) = c_0 \cdot e^{-k_{el}t}; \quad \text{Д. } c(t) = c_0 \cdot e^{-2k_{el}t}.$$

3. Час напіввиведення препарату складає:

А	$t_{1/2} = k_{el} \ln \frac{1}{2}$	Б	$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{el}}$	В	$t_{1/2} = \frac{\lg 2}{k_{el}}$	Г	$t_{1/2} = \frac{2}{k_{el}}$	Д	$t_{1/2} = k_{el} \ln 2$
---	------------------------------------	---	----------------------------------	---	----------------------------------	---	------------------------------	---	--------------------------

4. У моделі, що описує безперервну інфузію препарату, з часом його концентрація:

А. зменшується за експоненціальним законом;

- Б. лінійно зростає;
- В. залишається незмінною;
- Г. зростає і асимптотично наближається до постійного значення c^* ;
- Д. збільшується до деякого значення t_{max} , а потім знижується

5. Швидкість введення препарату, необхідна для того, щоб його концентрація в крові була постійною і дорівнювала c , складає:

А	$v = c^2 V k_{el}$	Б	$v = c V k_{el}$	В	$v = -2c V k_{el}$	Г	$v = c V k_{el} k_{in}$	Д	$v = c V^2 k_{el}$
---	--------------------	---	------------------	---	--------------------	---	-------------------------	---	--------------------

6. В'язкість крові:

- А. у дрібних судинах більше, ніж у великих;
- Б. у дрібних судинах менше, ніж у великих;
- В. постійна в усіх відділах судинного русла.

7. Зі збільшенням гематокриту в'язкість крові:

А	зростає	Б	убуває	В	не змінюється
---	---------	---	--------	---	---------------

8. У яких судинах більше вірогідність виникнення турбулентної течії?

- А. у великих;
- Б. дрібних;
- В. виникнення турбулентності не залежить від діаметру судини

9. Течія крові по судинам є:

- А. завжди ламінарним;
- Б. завжди турбулентним;
- В. переважно ламінарним і лише в деяких випадках турбулентним;
- Г. переважно турбулентним і лише в деяких випадках ламінарним.

10. У якому відділі судинного русла лінійна швидкість кровотоку мінімальна?

А	аорті	Б	артеріях	В	артеріолах	Г	капілярах	Д	венах
---	-------	---	----------	---	------------	---	-----------	---	-------

11. Основною рушійною силою кровотоку є:

- А. статичний тиск;

Б. трансмуральна;

В. гідростатична;

Г. кров'яна, обумовлена перевищенням тиску, викликаного роботою серця, над атмосферним тиском;

Д. сила тяжіння.

12. Який відділ судинного русла має найбільший гідравлічний опір?

А	аорта	Б	артерії	В	артеріоли	Г	капіляри	Д	вени
---	-------	---	---------	---	-----------	---	----------	---	------

13. Збільшення тенденції еритроцитів до агрегації викликає:

А	зростання швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ)	Б	зниження ШОЕ	В	не відбивається на ШОЕ
---	--	---	--------------	---	------------------------

14. Тимчасова залежність тиску діастолі, обчислена в моделі Франка, має вигляд:

А. $p = p_c(t + CX)$; Б. $p = p_c + CXt$; В. $p = p_c \exp\left(-\frac{t}{CX}\right)$;

Г. $p = p_c + \frac{t}{CX}$; Д. $p = p_c \ln \frac{t}{CX}$.

15. Еластичність кровоносних судин має наступний електричний еквівалент:

А	електричний потенціал	Б	електричний опір	В	індуктивність	Г	електрична ємність	Д	електричний струм
---	-----------------------	---	------------------	---	---------------	---	--------------------	---	-------------------

16. Швидкість поширення пульсової хвилі визначається по наступній формулі:

А	$v = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}}$	Б	$v = \frac{\rho gh}{\eta}$	В	$v = \left(\frac{E}{\rho d}\right)^2$	Г	$v = \sqrt{\frac{1}{Ed}}$	Д	$v = \frac{\rho h}{E\eta}$
---	--------------------------------	---	----------------------------	---	---------------------------------------	---	---------------------------	---	----------------------------

17. Пульсовою хвилею називаються періодичні коливання:

А. швидкості поширення часток;

Б. лінійної швидкості кровотоку;

В. об'ємної швидкості кровотоку;

Г. статичного тиску;

Д. кров'яного тиску, тобто поширення вздовж кровоносних судин.

18. Швидкості поширення часток крові (v_k), пульсової хвилі (v_{Π}) і звукової хвилі (v_3) в крові співвідносяться таким чином:

А	$v_{\Pi} < v_k < v_3$	Б	$v_k < v_{\Pi} < v_3$	В	$v_3 < v_{\Pi} < v_k$	Г	$v_{\Pi} < v_3 < v_k$	Д	$v_3 < v_k < v_{\Pi}$
---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------

19. Фільтрації крові сприяють:

- А. гідростатичний тиск в капілярах і онкотичний тиск плазми;
- Б. гідростатичний тиск в капілярах і онкотичний тиск тканинної рідини;
- В. гідростатичний тиск в тканинній рідині і онкотичний тиск плазми;
- Г. гідростатичний тиск в тканинній рідині і онкотичний тиск тканинної рідини.

20. У нормальних фізіологічних умовах в капілярній мережі:

- А. фільтрація трохи перевершує реабсорбцію;
- Б. реабсорбція трохи перевершує фільтрацію;
- В. реабсорбція повністю компенсує фільтрацію

21. Коефіцієнт заломлення зредукованого ока складає:

А	0,53	Б	1	В	1,38	Г	4,5	Д	10
---	------	---	---	---	------	---	-----	---	----

22. Акомодацією називається:

- А. зміна показника заломлення рогівки;
- Б. порушення колірному зору;
- В. зміна кривизни рогівки;
- Г. зміна показника заломлення склоподібного тіла;
- Д. зміна кривизни кришталика, завдяки чому на сітківці фокусуються по-різному видалені предмети.

23. Відстанню найкращого бачення називається:

- А. мінімальна відстань, на якій акомодация не викликає напруги при розгляді предметів;
- Б. відстань, на якій при розгляді предметів радіус кривизни рогівки максимальний;
- В. мінімальна відстань між колбами сітківки;

- Г. мінімальна відстань між паличками сітківки;
- Д. відстань, на якій коефіцієнт заломлення збільшується в e разів.

24. Причиною існування сферичної аберації є:

- А. явище дисперсії;
- Б. помутніння кришталіка;
- В. відшаровування сітківки;
- Г. нерівномірний розподіл паличок і колб на сітківці;
- Д. відмінність у фокусній відстані центральної частини рогівки і кришталіка в порівнянні з фокусною відстанню їх периферичної частини.

25. Причиною існування хроматичної аберації є:

- А. явище дисперсії;
- Б. помутніння кришталіка;
- В. відшаровування сітківки;
- Г. нерівномірний розподіл паличок і колб на сітківці;
- Д. відмінність у фокусній відстані центральної частини рогівки і кришталіка в порівнянні з фокусною відстанню їх периферичної частини.

26. При короткозорості:

- А. відстань найкращого бачення дорівнює 25 см;
- Б. відстань найкращого бачення менше 25 см;
- В. відстань найкращого бачення більше 25 см;
- Г. радіуси кривизни рогівки розрізняються в двох взаємноперпендикулярних напрямках;
- Д. порушене сприйняття кольорів.

27. При далекозорості:

- А. відстань найкращого бачення дорівнює 25 см;
- Б. відстань найкращого бачення менше 25 см;
- В. відстань найкращого бачення більше 25 см;
- Г. радіуси кривизни рогівки розрізняються в двох взаємноперпендикулярних

напрямах;

Д. порушене сприйняття кольорів.

28. При астигматизмі:

А. відстань найкращого бачення дорівнює 25 см;

Б. відстань найкращого бачення менше 25 см;

В. відстань найкращого бачення більше 25 см;

Г. радіуси кривизни рогівки розрізняються в двох взаємоперпендикулярних напрямках;

Д. порушене сприйняття кольорів.

29. Пульсова хвиля – це...

А. хвиля підвищеного тиску, що поширюється в аорті і артеріях

Б. швидкість кровотоку у великих артеріях

В. частота пульсу

Г. систолічний тиск

Д. діастолічний тиск

30. Чому швидкість крові у капілярах найменша?

А. тому, що там найменший тиск

Б. тому, що площа перерізу капіляра найменша

В. тому, що загальна площа перерізу капілярів найбільша

Г. тому, що капіляри далеко від серця

Д. тому, що там найбільший тиск

31. Чи може систолічний тиск бути меншим за діастолічний?

А	так, при деяких хворобах	Б	так, завжди	В	ніколи	Г	це залежить від методу вимірювання	Д	завжди
---	--------------------------	---	-------------	---	--------	---	------------------------------------	---	--------

32. Швидкість руху крові в аорті складає приблизно...

А	0,5 м/с	Б	1 м/с	В	5 м/с	Г	10 м/с	Д	100 м/с
---	---------	---	-------	---	-------	---	--------	---	---------

33. У великих судинах одночасно відбуваються:

1	переміщення часток крові	2	поширюється пульсова хвиля	3	поширюється звукова хвиля
А	1+2	Б	1+3	В	2+3

34. Кров це рідина (1 або 2), оскільки це (3 або 4)

1	ньютонівська рідина	2	неньютонівська рідина	3	однорідна рідина	4	суспензія
А	1+4	Б	2+4	В	2+3	Г	1+3

35. При моделюванні ЕКГ припускають, що довкілля диполя:

1	однорідне	2	ізотропне	3	обмежене
1'	неоднорідне	2'	анізотропне	3'	нескінченне

А	1+2+3	Б	1'+2'+3'	В	1+2'+3	Г	1+2+3'
---	-------	---	----------	---	--------	---	--------

36. Які з видів руху є присутніми в системі кров-судина?

1	Переміщення часток крові	2	Поширення пульсової хвилі	3	Поширення звукових хвиль	4	Все вище перераховане А-В
А	1+2	Б	2+3	В	3+4	Г	1+4

37. Який порядок має швидкість переміщення часток крові

А	1 м/с	Б	10 м/с	В	100 м/с
---	-------	---	--------	---	---------

38. Рух крові є прикладом

А	ламінарної течії рідини	Б	турбулентної течії рідини	В	Ламінарної та турбулентної течій рідини
---	-------------------------	---	---------------------------	---	---

39. Найбільший гідравлічний опір мають:

А	аорта	Б	артерії	В	артеріоли	Г	капіляри
---	-------	---	---------	---	-----------	---	----------

40. Основними вимогами до моделей є:

1	Адекватність	2	Межі застосовності	3	Модель "чорного ящика"	4	Все вище перераховане А-В
А	1+2	Б	2+3	В	3+4	Г	1+4

41. Модель є об'єктом, зручним для експериментальних досліджень. Це визначення:

А	Фізичної моделі	Б	Математичної моделі	В	Біологічної моделі
---	-----------------	---	---------------------	---	--------------------

42. Швидкість поширення пульсової хвилі визначається по формулі:

А	$v_i = \sqrt{\frac{Eh}{2r\rho}}$	Б	$v_i = \sqrt{\frac{E}{2r\rho}}$	В	$v_i = \sqrt{\frac{Eh}{2\rho}}$
---	----------------------------------	---	---------------------------------	---	---------------------------------

43. Йони якого металу грають ключову роль в активації м'язового скорочення?

А	Са	Б	Fe	В	Cl	Г	К
---	----	---	----	---	----	---	---

44. Які з нижче перерахованих сил чинять основний вплив на утворення вторинної структури білка?

А	хімічного зв'язку	Б	водневого зв'язку	В	Ван-дер-Ваальса
---	-------------------	---	-------------------	---	-----------------

45. Найбільш вірогідна конформація білка:

А	Витягнутий ланцюжок мономерів	Б	Клубок	В	Глобула
---	-------------------------------	---	--------	---	---------

46. Сила Ван-дер-Ваальсовської взаємодії для полімерів визначається як:

1	Орієнтаційна взаємодія	2	Дисперсійна взаємодія	3	Воднева взаємодія	4	Індукційна взаємодія
А	1+2+3	Б	2+3+4	В	1+2+4	Г	1+3+4

47. Сила скорочення, генерована м'язом, визначається:

- А. довжиною активної частини;
- Б. зміною сили, генерованої одним містком;
- В. кількістю одночасно замкнутих містків;
- Г. пружністю міозинової нитки.

48. Яка з названих хімічних сполук не є біополімером?

А	білок	Б	ліпід	В	дезоксирибонуклеїнова кислота	Г	рибонуклеїнова кислота
---	-------	---	-------	---	-------------------------------	---	------------------------

49. Який з продуктів доцільніше давати втомленому марафонцеві на дистанції для підтримки сил?

А	шматочок м'яса	Б	шматочок цукру	В	трохи мінеральної води	Г	трохи вершкового масла
---	----------------	---	----------------	---	------------------------	---	------------------------

50. Вода має здатність розчиняти йонні речовини тому, що:

А. вона містить йони

Б. її молекули полярні

В. атоми в її молекулах сполучені йонними зв'язками

Г. містить кисень

Д. атоми в її молекулах пов'язані ковалентними зв'язками

6.1.5. Біосфера та фізичні поля живого організму

1. Абсолютний показник заломлення n середовища дорівнює:

А	$\frac{v}{c}$	Б	$\frac{\sin i}{\sin r}$	В	$\frac{n_1}{n_2}$	Г	$\frac{c}{v}$	Д	$\frac{\sin r}{\sin i}$
---	---------------	---	-------------------------	---	-------------------	---	---------------	---	-------------------------

2. Закон заломлення Снеліуса має вигляд (i – кут падіння; r – кут заломлення):

А	$n = \frac{v}{c}$	Б	$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\cos i}{\cos r}$	В	$\frac{v}{c} = \frac{\sin i}{\cos r}$	Г	$\frac{v}{c} = \frac{\sin i}{\sin r}$	Д	$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r}$
---	-------------------	---	---	---	---------------------------------------	---	---------------------------------------	---	---

3. Формула тонкої лінзи має вигляд:

А. $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$;

Б. $\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$;

В. $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = (n+1)\frac{1}{f}$;

Г. $(1-n)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{D}$;

Д. $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = f$.

4. Умова максимуму інтенсивності світла при інтерференції:

А	$\Delta r = 2k \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2}$	Б	$\Delta r = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$	В	$\Delta r = 2k \frac{\lambda}{2}$	Г	$\Delta r = k \frac{\lambda}{2}$	Д	$\Delta r = (2k-1) \frac{\lambda}{2}$
---	---	---	---------------------------------------	---	-----------------------------------	---	----------------------------------	---	---------------------------------------

5. Умова мінімуму інтенсивності світла при інтерференції в тонкій плівці для відбитого світла:

А. $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = 2k \frac{\lambda}{2}$;

Б. $2n\sqrt{d^2 - \cos^2 i} = 2k \frac{\lambda}{2}$;

В. $2d\sqrt{n^2 + \sin^2 i} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$;

Г. $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$;

Д. $2n\sqrt{d^2 + \cos^2 i} = 2k \frac{\lambda}{2}$.

6. Радіуси світлих кілець Ньютона у світлі, що проходить, визначаються за формулою:

А. $r_k = \sqrt{kR \frac{\lambda}{2}}$;

Б. $r_k = \sqrt{(k + 1)R \frac{\lambda}{2}}$;

В. $r_k = \sqrt{2kR \frac{\lambda}{2}}$;

Г. $r_k = \sqrt{(2k + 1)R \frac{\lambda}{2}}$;

Д. $r_k = \sqrt{(k + 1)R\lambda}$.

7. Умова мінімуму у разі дифракції від однієї щілини при нормальному падінні на неї паралельного пучка монохроматичного світла:

А. $a \sin \alpha = \pm(k + 1) \frac{\lambda}{2}$;

Б. $a \sin \alpha = \pm(2k + 1)\lambda$;

В. $a \sin \alpha = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$;

Г. $a \sin \alpha = \pm k \frac{\lambda}{2}$;

Д. $a \sin \alpha = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$.

8. Умова головних максимумів дифракційних решіток:

А. $c \sin \alpha = \pm k\lambda$;

Б. $c \tan \alpha = \pm(2k + 1)\lambda$;

В. $c \tan \alpha = \pm 2k\lambda$;

Г. $c \sin \alpha = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$;

Д. $c \cos \alpha = \pm(2k + 1)\lambda$.

9. Межа роздільної здатності мікроскопу (при відбитті світла від об'єкта) при похилому падінні світла на об'єкт:

А. $z = \frac{2\lambda}{n \sin \frac{u}{2}}$;

Б. $z = 0.5 \frac{n}{\lambda \sin \frac{u}{2}}$;

В. $z = 0.5 \frac{\lambda}{n \cos \frac{u}{2}}$;

$$\Gamma. z = 0.5 \frac{\lambda}{n \sin \frac{u}{2}}; \quad \Delta. z = \frac{2\lambda}{n \cos \frac{u}{2}}.$$

10. Закон поглинання світла Бугера-Ламберта має вигляд (I – інтенсивність світла, що пройшло; I_0 – інтенсивність світла, що падає):

$$\text{А. } I = I_0 \exp(\chi l); \quad \text{Б. } I = I_0^2 \exp(-\chi l); \quad \text{В. } I = \frac{1}{2} I_1;$$

$$\text{Г. } I = I_0 \exp(-\chi l); \quad \text{Д. } I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

11. Закон поглинання світла в розчинах (закон Бугера-Ламберта-Вера) має вигляд:

$$\text{А. } I = I_0 \exp(\chi l); \quad \text{Б. } I = \frac{1}{2} I_1; \quad \text{В. } I = I_0 \exp(-\varepsilon cl);$$

$$\text{Г. } I = I_0 \cos^2 \alpha; \quad \text{Д. } I = I_0 \exp(\varepsilon cl).$$

12. Кут повороту площини поляризації в розчині оптично активної речовини складає:

$$\text{А. } \alpha = [\alpha_0] cl; \quad \text{Б. } \alpha = \alpha_0 \cos^2 \varphi; \quad \text{В. } \alpha = \alpha_1 \exp(-\varepsilon cl);$$

$$\text{Г. } \alpha = \tan c; \quad \text{Д. } \alpha = [\alpha_0] \exp(-cl).$$

13. Закон Стефана-Больцмана для абсолютно чорного тіла має вигляд:

А	$R_{\nu,T} = \sigma T^2$	Б	$R_{\nu,T} = \sigma^4 \sqrt{T}$	В	$R_{\nu,T} = k(\sigma T)^2$	Г	$R_{\nu,T} = \sigma T^4$	Д	$R_{\nu,T} = k\sigma^4 T$
---	--------------------------	---	---------------------------------	---	-----------------------------	---	--------------------------	---	---------------------------

14. Закон зміщення Віна має вигляд:

А	$\lambda_{\max} = bT$	Б	$\lambda_{\max} = bT^4$	В	$\lambda_{\max} = \sigma T^4$	Г	$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$
---	-----------------------	---	-------------------------	---	-------------------------------	---	--------------------------------

15. Закон зміщення Віна (перший закон Віна) має вигляд:

$$\text{А. } \lambda_{\max} T^4 = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ і} \cdot \hat{E}^4; \quad \text{Б. } \lambda_{\max} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ і} \cdot \hat{E};$$

$$\text{В. } \lambda_{\max} T = 8,31 \cdot 10^{-3} \text{ і} \cdot \hat{E}; \quad \text{Г. } \lambda_{\max} T^4 = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ і} \cdot \hat{E}^4;$$

$$\text{Д. } k\sigma T^4 = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ і} \cdot \hat{E}.$$

16. Інтенсивність пучка рентгенівських променів, що пройшли крізь пластинку завтовшки x , визначається формулою:

А	$I = I_0 e^{-\mu x}$	Б	$I = \mu I_0 x$	В	$I = \mu I_0 x^2$	Г	$I = \frac{I_0}{x}$	Д	$I = I_0 \sqrt{\mu x}$
---	----------------------	---	-----------------	---	-------------------	---	---------------------	---	------------------------

17. Проникаюча здатність випромінювання характеризує ...

- А. енергію, передану речовині на одиницю довжини пробігу;
- Б. енергію, передану речовині за одиницю часу;
- В. відстань, на якій енергія випромінювання зменшується в 2 рази;
- Г. відстань, на якій енергія випромінювання зменшується в e разів;
- Д. відстань, яку випромінювання проходить в речовині, зберігаючи здатність до йонізації.

18. Енергія мікрохвильового випромінювання достатня:

- А. для збудження атомів, але не їх йонізації;
- Б. збудження та йонізації атомів;
- В. переважно йонізації атомів;
- Г. недостатня ні для того, ні для іншого;
- Д. правильної відповіді немає.

19. Глибиною проникнення електромагнітного випромінювання у біологічні тканини називається відстань, на якій:

- А. потужність енергії, що падає, збільшується в e разів;
- Б. довжина хвилі випромінювання збільшується в e разів;
- В. потужність енергії, що падає, зменшується в e разів;
- Г. довжина хвилі випромінювання зменшується в e разів;
- Д. довжина хвилі випромінювання зменшується в 10 разів.

20. Найбільшим відомим типом живої системи є:

А	біоценоз	Б	організм	В	популяція
---	----------	---	----------	---	-----------

21. Найменша елементарна жива система:

А	клітина	Б	організм	В	хромосома	Г	органела
---	---------	---	----------	---	-----------	---	----------

22. Хвильову природу світла підтверджує таке явище як

А	заломлення	Б	відбивання	В	дифракція	Г	поглинання
---	------------	---	------------	---	-----------	---	------------

23. Яка із наведених формул відповідає формулі де Бройля для довжини хвилі, яка приписується рухомій частинці? (m - маса частинки, c - швидкість світла у вакуумі, v - швидкість частинки, T - період коливання частинки, h - стала Планка):

А	$\lambda = \frac{mc}{h}$	Б	$\lambda = \frac{h}{m + c}$	В	$\lambda = \frac{h}{mv}$	Г	$\lambda = cT$
---	--------------------------	---	-----------------------------	---	--------------------------	---	----------------

24. Яке співвідношення відповідає питомій енергії зв'язку ядра? (Z – число протонів, N – число нейтронів, A – число нуклонів)

А	$\delta E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{Z}$	Б	$\delta E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$	В	$\delta E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{N}$	Г	$\delta E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{m_{\text{я}}}$
---	--	---	--	---	--	---	---

25. Корпускулярні властивості світла проявляються під час:

А. дифракції світла

Б. розкладання білого світла в спектр за допомогою призми

В. фотоефекту

Г. інтерференції двох світлових пучків

26. Вкажіть, яка відповідь може бути закінченням фрази: «Періодом піврозпаду T радіоактивного елемента називається час, протягом якого...

А. ... розпадаються всі його радіоактивні атоми».

Б. ... розпадаються 50% його атомів».

В. ... кількість його радіоактивних атомів зменшується в e - разів».

Г. ... розпадаються 0,5% його радіоактивних атомів».

27. Кількість теплоти, що виділяється при індуктотермії визначається за формулою:

А	$q = \frac{Q}{V \cdot \Delta t}$	Б	$q = k \frac{B^2 \omega^2}{\rho}$	В	$q = k \omega \varepsilon E^2$
---	----------------------------------	---	-----------------------------------	---	--------------------------------

28. Кількість теплоти, що виділяється при діатермії визначається за формулою:

А	$q = \frac{Q}{V \cdot \Delta t}$	Б	$q = k \frac{B^2 \omega^2}{\rho}$	В	$q = k \omega \varepsilon E^2$
---	----------------------------------	---	-----------------------------------	---	--------------------------------

29. Тепловий ефект, обумовлений струмом зміщення визначається за формулою:

А	$q = \frac{Q}{V \cdot \Delta t}$	Б	$q = k \frac{B^2 \omega^2}{\rho}$	В	$q = k \omega \varepsilon E^2$
---	----------------------------------	---	-----------------------------------	---	--------------------------------

30. Тепло, що виділяється в розчинах електролітів під дією УВЧ-електричного поля визначається за формулою:

А	$Q = K_3 \varepsilon \varepsilon_0 \nu E_{\dot{a}\dot{o}}^2 \tan \delta Vt$	Б	$Q = K_2 \sigma E_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$	В	$Q = K_1 \sigma \omega^2 B_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$
---	---	---	--	---	---

31. Кількість тепла, що виділяється в об'ємі V діелектрика за час t внаслідок діелектричних витрат, визначається виразом:

А	$Q = K_1 \sigma \omega^2 B_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$	Б	$Q = K_2 \sigma E_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$	В	$Q = K_3 \varepsilon \varepsilon_0 \nu E_{\dot{a}\dot{o}}^2 \tan \delta Vt$
---	---	---	--	---	---

32. Кількість тепла Q , що виділяється в об'ємі розчину V за час t , виражається формулою:

А	$Q = K_2 \sigma E_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$	Б	$Q = K_1 \sigma \omega^2 B_{\dot{a}\dot{o}}^2 Vt$	В	$Q = K_3 \varepsilon \varepsilon_0 \nu E_{\dot{a}\dot{o}}^2 \tan \delta Vt$
---	--	---	---	---	---

33. В яких одиницях вимірюється потужність поглинутої дози?

А	Грей	Б	Рентген	В	Вт/кг	Г	Зіверт
---	------	---	---------	---	-------	---	--------

34. В яких одиницях вимірюється потужність експозиційної дози?

А	Гр	Б	Р/с	В	Вт/кг	Г	Зв
---	----	---	-----	---	-------	---	----

35. Кількість якого газу у видихуваному повітрі збільшується?

А	кисень	Б	вуглекислий газ	В	азот	Г	інертні гази
---	--------	---	-----------------	---	------	---	--------------

36. Який газ при газообміні в легенях видаляється з крові?

А	кисень	Б	вуглекислий газ	В	азот	Г	інертні гази
---	--------	---	-----------------	---	------	---	--------------

37. Який газ при тканинному газообміні видаляється з крові?

А	кисень	Б	вуглекислий газ	В	азот	Г	інертні гази
---	--------	---	-----------------	---	------	---	--------------

38. Що керує дихальною системою?

А	середній мозок	Б	проміжний мозок	В	поздовжній мозок
---	----------------	---	-----------------	---	------------------

39. Формовими елементами крові є:

А	еритроцити	Б	плазма	В	лімфа
---	------------	---	--------	---	-------

40. Еритроцити мають форму:

А	овал	Б	куля	В	двовипуклого диску	Г	диску
---	------	---	------	---	--------------------	---	-------

41. У згортанні крові беруть участь:

А	еритроцити	Б	лейкоцити	В	тромбоцити
---	------------	---	-----------	---	------------

42. Мале коло кровооберту починається в:

А	правому передсерді	Б	правому шлуночку	В	лівому передсерді	Г	лівому шлуночку
---	--------------------	---	------------------	---	-------------------	---	-----------------

43. Група крові людини – універсального донора:

А	1	Б	2	В	3	Г	4
---	---	---	---	---	---	---	---

44. Група крові людини – універсального реципієнта:

А	1	Б	2	В	3	Г	4
---	---	---	---	---	---	---	---

45. У людини є декілька кіл кровооберту, їх всього:

А	1	Б	2	В	3	Г	4
---	---	---	---	---	---	---	---

46. Друга фаза серцевого циклу називається:

А	скороченням передсердя	Б	скороченням шлуночків	В	паузою
---	---------------------------	---	--------------------------	---	--------

47. Тривалість третьої фази серцевого циклу (в секундах):

А	1	Б	0,2	В	0,8	Г	0,4
---	---	---	-----	---	-----	---	-----

48. Рідка частина крові називається:

А	лімфа	Б	плазма	В	міжклітинна рідина
---	-------	---	--------	---	--------------------

49. Гемоглобін входить у склад таких формових елементів крові:

А	ерітроцитів	Б	лейкоцитів	В	тромбоцитів
---	-------------	---	------------	---	-------------

50. Стінки судин утворені шарами тканин, цих шарів:

А	1	Б	2	В	3	Г	4
---	---	---	---	---	---	---	---

6.2. Відповіді на тестові завдання

Основи біомеханіки

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	А	Б	А	Г	Г	Г	Б	В	Г	А
Завдання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Відповідь	В	Г	А	Д	Г	В	Б	Г	А	Д
Завдання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Відповідь	А	Г	Г	В	В	А	В	В	А	А
Завдання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Відповідь	В	Б	В	А	Б	А	В	Б	В	В
Завдання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Відповідь	А	Г	Б	Б	В	А	А	В	А	Б

Термодинаміка біологічних процесів та систем

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	В	А	А	А	А	Б	Б	В	А	Б
Завдання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Відповідь	А	В	Б	А	Б	Б	В	Б	В	В
Завдання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Відповідь	Г	Б	Г	А	В	В	Д	А	Б	В
Завдання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Відповідь	В	А	В	А	В	Г	Д	Б	Б	Г
Завдання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Відповідь	Г	А	Б	А	А	Б	Г	Д	В	Б

Молекулярна біофізика

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	В	Г	Г	А	Д	Б	А	Б	Г	Д
Завдання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Відповідь	Б	Г	В	Г	В	А	Б	Г	В	Г

Завдання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Відповідь	Б	Б	А	Д	А	А	Г	А	Б	Б
Завдання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Відповідь	Б	В	В	Г	Г	Б	А	А	Б	Д
Завдання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Відповідь	Г	В	Г	Б	А	Б	Г	В	А	А

Біофізика складних біологічних систем

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	Д	Г	Б	Г	Б	Б	А	А	В	Г
Завдання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Відповідь	Г	В	А	В	Г	А	Д	Б	Б	А
Завдання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Відповідь	В	Д	А	А	А	Б	В	Г	А	В
Завдання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Відповідь	В	В	А	Б	Б	А	А	В	В	А
Завдання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Відповідь	А	А	А	Б	Б	В	Б	Б	Б	Б

Біосфера та фізичні поля живого організму

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відповідь	Г	Д	А	В	А	В	Д	А	Г	Г
Завдання	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Відповідь	В	А	Г	Г	Б	А	А	Г	А	А
Завдання	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Відповідь	А	В	В	Б	В	Б	Б	А	В	Б
Завдання	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Відповідь	В	Б	В	Б	Б	Б	А	В	А	В
Завдання	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Відповідь	В	Б	А	Г	Б	Б	Г	Б	А	В

Перелік літературних джерел

1. Антонов В.Ф. Биофизика. Учеб. для студ. ВУЗов / В.Ф. Антонов, А.М. Черныш, В.И. Пасечник. – М.: ГИЦ ВЛАДОС, 2000. – 288 с.
2. Антонов В.Ф. Практикум по биофизике / В.Ф. Антонов, А.М. Черныш, В.И. Пасечник. – М.: ГИЦ ВЛАДОС, 2001. – 352 с.
3. Бегун П.И. Биомеханика: учебник для вузов / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. – СПб.: Политехника, 2000. – 464 с.
4. Біофізика: Підруч. для студ. біолог., медичних та фізичних факультетів ВУЗів / Під ред. П.Г. Костюка. - К.: Обереги, 2001. – 544 с.
5. Біофізика і біомеханіка: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко [та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2012.– 344 с.
6. Биофизика / Ю.А. Владимиров [и др.]. – М.: Владос, 2003. – 288 с.
7. Блинов Н.Н. Основы рентгенодиагностической техники: учеб. пособие / Н.Н. Блинов [и др.]; под ред. Н.Н. Блинова. – М.: Медицина, 2004. – 256 с.
8. Бриль Г.Е. Молекулярно-кинетические основы терапевтического действия низкоинтенсивного лазерного излучения: Уч.пособие / Г.Е.Бриль. – Саратов: Мед.ун-т, 2002. – 43 с.
9. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с.
10. Дубовский В.И. Биомеханика / В.И. Дубовский, В.Н. Федорова. – М.: Владос-пресс, 2003. – 672 с.
11. Зима В.Л. Біофізика. Збірник задач: Навчальний, посібник для студентів біологічних, медичних, та фізичних факультетів / В.Л. Зима. – К.:Вища школа, 2001.– 504 с.
12. Іщейкіна Ю.О. Медична і біологічна фізика [Навчальний посібник] / Ю.О. Іщейкіна, В.І. Макаренко, Н.В. Тронь. – Полтава, 2012. – 352 с.
13. Каро К. Механика кровообращения / К. Каро [и др.]; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 624 с.

14. Козел С.М. Сборник задач по физике / С.М.Козел, Э.И.Рашба, С.А. Славатинский. – М.: Наука, 1987. – 301 с.
15. Кузмичев В.Е. Законы и формулы физики: Справочник / В.Е. Кузмичев. – К.: Наук.думка, 1989. – 861 с.
16. Левтов В.А. Реология крови / В.А. Левтов, С.А. Регирер, Н.Х. Шадрина. – М.: Медицина, 1982. – 272 с.
17. Лещенко В.Г. Медицинская и биологическая физика: учеб. пособие / В.Г. Лещенко, Г.К. Ильич. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. – 552 с.
18. Марченко М.М. 1000 задач з біофізики та радіобіології / М.М. Марченко, Я.А. Свербиус, С.С. Костишин. – Чернівці: „Рута“, 2002. – 202 с.
19. Медик В.А. Статистика в медицине и биологии. В 2 т. / В.А. Медик, М.С. Токмачев, Б.Б. Фишман. – М.: Медицина, 2001. – 352 с.
20. Медична і біологічна фізика: Підр. для студ. вищ. мед. закладів освіти III-IV рівнів акредитації / Під ред. Чалого О.В., Т.2. – К.: ВПОЛ, 2001. – 415 с.
21. Медицинские приборы / Под ред. И.В. Камышко. – М: Медицинская книга, 2004. – 720 с.
22. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2003. – 616 с.
23. Ремизов Л.Н. Сборник задач по медицинской и биологической физике / Л.Н. Ремизов, Н.Х. Исакова, Л.Г. Максина. – М.: Высш. шк., 1987. – 159 с.
24. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике / И.В. Савельев. – М.: Астрель; АСТ, 2001. – 319 с.
25. Самойлов В.О. Медицинская биофизика: учебник для вузов / В.О. Самойлов. – СПб.: СпецЛит, 2007. – 559 с.
26. Тесты по медицинской и биологической физике. – М.: Книжный мир, 2010. – 176 с.
27. Тиманюк В.А. Биофизика: Учебник для студ. вузов / В.А. Тиманюк, Е.Н. Животова. – Х.: Изд-во НФАУ; Золотые страницы, 2003. – 704 с.

28. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями: Учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова. – М.: Высш.шк., 2001. – 591 с.
29. Физика и биофизика: учебник для вузов / В.Ф. Антонов [и др.]; под ред. проф. В.Ф. Антонова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 256 с.
30. *Юнкеров В.И.* Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований / В.И. Юнкеров, С.Г. Григорьев. – СПб: Элби, 2002. – 318 с.
31. Joseph R. Lakowicz. Principles of Fluorescence Spectroscopy / R. J. Lakowicz. - N.Y.: Springer Science, 2006. — 960 p.

ДОВІДНИКОВІ ДАННІ ТА ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ

Деякі фізичні константи

Діелектрична проникність вакууму, ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12}$ Ф / м
Магнітна проникність вакууму, μ_0	$12,56 \times 10^{-7}$ Н/А ²
Заряд електрона, e	$1,6 \times 10^{-19}$ Кл
Постійна Больцмана, k_B	$1,38 \times 10^{-23}$ Дж / К
Постійна Авогадро, N_A	$6,02 \times 10^{23}$ моль ⁻¹
Універсальна газова стала, R	8,31 Дж / К·моль
Постійна Фарадея, F	96485 Кл/моль
Швидкість світла у вакуумі, c	$299792,5 \cdot 10^3$ м/с
Показник заломлення світла для повітря (760 мм.рт.ст., 20 °С), n	1,000274
Стала Планка, h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Середній калоричний еквівалент кисню	20,52 кДж
Енергетична цінність поживних речовин:	
- білки	20,1 МДж/кг (4,8 ккал/г)
- жири	39,8 МДж/кг (9,5 ккал/г)
- вуглеводи	17,16 МДж/кг (4,1 ккал/г)
- алкоголь	30 МДж/кг (7,2 ккал/г)

1. Фізичні властивості деяких твердих та в'язко-пружних речовини

Речовина	Густина ρ , кг/м ³	Модуль Юнга E , ГПа	Межа механічної міцності [σ], МПа	Лінійний коефіцієнт термічного розширення α при 20 °С, 10 ⁻⁶ /К	Об'ємний коефіцієнт термічного розширення β при 20 °С, 10 ⁻⁶ /К
1	2	3	4	5	6
Золото	19300	79	140	14,2	42,6
Свинець	11300	18	16	30	90
Срібло	10500	82	140	19	57
Мідь	8890	110	340...450	17	51
Залізо, сталь	7870	196	150	11,1	33,3
Алюміній	2700	70	100	24	72
Алмаз	3500	88,2	2000	1	3
Кварц	2650	66	20	0,59	1,77
Скло	2400...5900	50...90	60...120	4...10	12...30
Кремній	2330	109	320...350	3	9
Лід при 0°С	917	3	1,6...3	1,2	3,6

1	2	3	4	5	6
Еритроцит	2500	$(1,4...1,7) \cdot 10^{-6}$	$(1...5) \cdot 10^{-4}$	—	—
Тканина кісткова	2000	7...30	50...150	12	36
Колаген	1050	0,1	100	—	—
Печінка	1300	$27 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	—	—
Еластин	900	$1 \cdot 10^{-4}$	5	77	231
Шкіра суха	860	23...44	6,2...14	150	450

2. Фізичні властивості деяких рідин

Рідина	Густина ρ , кг/м ³	Динамічна в'язкість η , мкПа·с	Коефіцієнт поверхневого натягу 20 °С, σ , мН/м	Лінійний коефіцієнт термічного розширення α при 20 °С, 10 ⁻⁶ /К	Об'ємний коефіцієнт термічного розширення β при 20 °С, 10 ⁻⁶ /К
1	2	3	4	5	6
Білок курячого яйця	1032	1700...2300	53	—	—
Вода при 0 °С	1000	1787	75,6	69	207
Гас	780	1200...4500	24	320	960
Гліцерин при 20 °С	1260	$1,48 \cdot 10^6$	65,7	168	505
Ефір	720	177...286	17	535	1600
Молоко	1034	1800	46	—	—
Олія касторова	940	$970 \cdot 10^3$	36,4	90	180
Плазма крові	1050	2000	58	100	300
Ртуть	13546	1526	50	60	181
Спирт етиловий при 20 °С	780	1200	22	250	750

3. Зв'язок калоричного коефіцієнта (К.К.) 1 л кисню з дихальним коефіцієнтом

Дихальний коефіцієнт	К.К., кДж	Дихальний коефіцієнт	К.К., кДж	Дихальний коефіцієнт	К.К., кДж	Дихальний коефіцієнт	К.К., кДж
1	2	3	4	5	6	7	8
0,70	19,619	0,78	19,996	0,86	20,411	0,94	20,821
0,71	19,636	0,79	20,051	0,87	20,461	0,95	20,871
0,72	19,686	0,80	20,101	0,88	20,515	0,96	20,921
0,73	19,737	0,81	20,151	0,89	20,566	0,97	20,976
0,74	19,791	0,82	20,201	0,90	20,616	0,98	21,026
0,75	19,841	0,83	20,256	0,91	20,666	0,99	21,076
0,76	19,896	0,84	20,306	0,92	20,716	1,00	21,131
0,77	19,946	0,85	20,360	0,93	20,767	—	—

4. Об'єм споживаного кисню і вуглекислого газу при окисленні 1 г поживної речовини

Речовина	Споживається O ₂ , л	Виділяється CO ₂ , л	Дихальний коефіцієнт
1	2	3	4
Білок	0,97	0,77	0,8
Жир	2,0	1,4	0,7
Вуглеводи	0,83	0,83	1,0

5. Електричні властивості деяких біологічних речовин

Речовина	Діелектрична проникність, ε	Питома електропровідність, σ, 1/Ом·м	Питомий опір, ρ, Ом·м	Тангенс кута витрат, tg δ _m
1	2	3	4	5
Вода	80	0,0001	10000	—
Біомембрана	100	10 ⁻⁵	50	—
Плазма крові	78	2	0,5	—
Жирова тканина	5,5	0,035	29	0,21
М'язова тканина	47	0,69	1,45	0,34

6. Параметри потенціала Ленарда-Джонса

Атоми	A×10 ⁶ кДж / моль·нм ⁶	B×10 ⁹ кДж / моль·нм ¹²
1	2	3
НН	197,4	18,9
СС	1554,0	1201,2
NN	1524,6	676,2
ОО	1541,4	609,0
СО	1541,4	861,0
CN	1537,2	907,2
СН	537,6	159,6
NO	1533,0	642,6
НО	520,8	105,0
NH	525,0	113,4

7. Потенціали (енергії) йонізації I₁

молекули	I ₁ , eВ	молекули	I ₁ , eВ	молекули	I ₁ , eВ
1	2	3	4	5	6
H ₂	15,4	H ₂ O	12,6	CH ₂	11,8
NH ₃	11,1	СН	11,1	NO ₂	11,0
HI	13,4	C ₂ H ₆	12,8	C ₆ H ₆	9,6
CH ₄	14,4	СО	14,1	Cl	13,0
CO ₂	14,4	He	24,6	N ₂	15,8
Ar	15,8	NO	9,5	F	17,4
O ₂	12,5	K	4,3	OH	13,2
Ca	6,1	HBr	13,2	Na	5,1
HCl	13,8	Mg	7,6	I	10,4

8. Оптичні властивості деяких речовин

Речовина	Абсолютний показник заломлення, n	Питоме магнітне обертання (стала Верде), с, дуг.хв.	Речовина	Абсолютний показник заломлення, n	Питоме магнітне обертання (стала Верде), с, дуг.хв.
1	2	3	4	5	6
Алмаз	2,41	—	Олія	1,51	—
Вода	1,33	0,013	Повітря	1,002	$6,83 \cdot 10^{-6}$
Глюкоза	1,35	—	Скло	1,5-2,1	0,016-0,089
Кварц	1,54	0,017	Спирт етиловий	1,36	0,86

9. Дипольні моменти та поляризуємість молекул

молекулы	$P, \times 10^{-30}$ Клм	$\alpha, \times 10^{-24}$ см ³	молекулы	$P, \times 10^{-30}$ Клм	$\alpha, \times 10^{-24}$ см ³
1	2	3	4	5	6
H ₂	0	0,79	N ₂	0	1,76
CO ₂	0	2,65	CO	0,33	1,95
HF	6,36	0,51	HCl	3,6	2,63
HBr	2,66	3,61	HI	1,4	5,45
H ₂ O	6,16	1,48	NH ₃	4,9	2,21
CCl ₄	—	10,11	CHCl ₃	3,63	—
CH ₃ Cl	6,23	8,23	CH ₄	—	2,60
CH ₃ OH	5,69	3,23	CH ₃ CH ₂ OH	5,67	—
C ₆ H ₆	—	10,32	C ₆ H ₅ CH ₃	1,2	—
He	—	0,20	Ar	—	1,60

10. Коефіцієнт послаблення γ -випромінювання

W, MeV	$\mu, \text{см}^{-1}$					
	Свинець	Вода	Алюміній	Залізо	Графіт	Повітря
1	2	3	4	5	6	7
0,10	65,0	0,171	0,455	2,91	0,342	$2,00 \cdot 10^{-4}$
0,20	11,1	0,137	0,328	1,15	0,277	$1,59 \cdot 10^{-4}$
0,40	2,62	0,106	0,249	0,740	0,214	$1,23 \cdot 10^{-4}$
0,50	1,80	0,0966	0,227	0,661	0,196	$1,12 \cdot 10^{-4}$
1,0	0,798	0,0279	0,165	0,471	0,143	$8,21 \cdot 10^{-5}$
2,0	0,518	0,0493	0,116	0,334	0,0999	$5,74 \cdot 10^{-5}$
3,0	0,475	0,0396	0,0950	0,284	0,0801	$4,63 \cdot 10^{-5}$
4,0	0,472	0,0340	0,0834	0,260	0,0684	$3,98 \cdot 10^{-5}$
5,0	0,480	0,0302	0,0761	0,247	0,0603	$3,54 \cdot 10^{-5}$
10	0,552	0,0220	0,0619	0,233	0,0439	$2,62 \cdot 10^{-5}$
15	0,628	0,0193	0,0584	0,241	0,0380	$2,31 \cdot 10^{-5}$
20	0,694	0,0180	0,0578	0,250	0,0351	$2,19 \cdot 10^{-5}$
30	0,792	0,0170	0,0584	0,269	0,0329	$2,08 \cdot 10^{-5}$
40	0,863	0,0166	0,0603	0,285	0,0320	$2,06 \cdot 10^{-5}$
50	0,915	0,0166	0,0616	0,299	0,0320	$2,08 \cdot 10^{-5}$

11. Вікові норми швидкості розповсюдження пульсової хвилі:

по судинах еластичного (v_e)

Вік, роки	v_e , м/с
1	2
14-30	5,7
31-50	6,6
51-70	8,5
71 та старіше	9,8

та м'язового (v_m) типів

Вік, роки	v_m , м/с
1	2
14-20	6,1
21-30	6,8
31-40	7,1
41-50	7,4
51 та старіше	9,3

ДОВІДНИКОВІ ДАННІ ПРО СИСТЕМИ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛЮДИНИ

12. Інформація про систему кровообігу людини

Характеристика	Значення
1	2
Час повного кровообігу дорослої людини при ЧСС 70-80	80-83 с
Частка часу повного кровообігу дорослої людини	
- велике коло кровообігу	4/5
- мале коло кровообігу	1/5
Поперечний переріз аорти	2,5 см ²
Загальний поперечний переріз капілярів великого кола кровообігу	2500 см ²
Діаметр капіляра	8...12 мкм
Довжина капіляра	0,4...0,6 мм
Число функціонуючих капілярів на 1 мм ³ поперечного перерізу скелетного м'яза	
- у стані спокою	32...270
- під час роботи	2500
Тиск у капілярах	
- на артеріальному кінці	30...35 мм.рт.ст.
- на венозному кінці	12...17 мм.рт.ст.
Кровообіг окремих органів, мл/хв	
- коронарний кровотік у стані спокою	200...250 (4-6% ХОК*)
- під час фізичної праці	до 5000 (15% ХОК*)
- кровотік головного мозку	55 мл / 100 г. тканини
- споживання кисню	3.7 мл/хв/100 г

* ХОК – хвилинний обіг крові.

13. Інформація про систему дихання людини

Характеристика	Значення
1	2
Частота дихання за 1 хв у стані спокою	16...20
Дихальний об'єм	500 мл (300...900 мл)
Резервний об'єм	
- вдиху	1500 мл (1000...2000 мл)
- видиху	1200 мл (1000...1500 мл)
Життєва ємкість легень	
- чоловіка	3500...5000 мл
- жінки	3000...3500 мл
Залишковий об'єм	1000 мл
«Мертвий простір»	150 мл
Загальна ємкість легень	4...6 л
Легенева вентиляція	
- у стані спокою	6...10 л/хв
- під час роботи	50...100 л/хв
Альвеолярна вентиляція в середньому	4200 мл/хв
Максимальна вентиляція легень	
- чоловіка	До 150 л/хв
- жінки	До 100 л/хв
Коефіцієнт альвеолярної вентиляції	1 / 7
Співвідношення між альвеолярною вентиляцією та легневим кровотоком	0,8
Внутрішньоплевральний тиск	
- під час видиху	5 см H ₂ O (0,75 кПа)
- під час вдиху	8 см H ₂ O (1,2 кПа)
Склад газів повітря	
- атмосферне	O ₂ – 20,93%; CO ₂ – 0,03%
- видихуване	O ₂ – 16%; CO ₂ – 4,4%
- альвеолярне	O ₂ – 14%; CO ₂ – 5,5%
Парціальний тиск газів у альвеолярному повітрі:	O ₂ – 14,7 кПа (102 мм рт. ст.) CO ₂ – 5,3 кПа (40 мм рт. ст.)
Тиск газів:	
- в артеріальній крові:	P _{O2} 13,3 кПа (96 мм рт. ст.) P _{CO2} 5,3 кПа (40 мм рт. ст.)
- у венозній крові:	P _{O2} 5,3 кПа (40 мм рт. ст.) P _{CO2} 6,3 кПа (46 мм рт. ст.)
- у міжклітинній рідині:	P _{O2} 2,6-5,3 кПа (20-40 мм рт. ст.) P _{CO2} 6,1 кПа (46 мм рт. ст.)
- у клітинах:	P _{O2} 0,6 кПа (5 мм рт. ст.) P _{CO2} 8 кПа (60 мм рт. ст.)
Споживання кисню	
- у стані спокою	250...300 мл/хв
- під час роботи	1300...2400 мл/хв
Виділення CO ₂	200...250 мл/хв
Киснева ємкість крові	20 мл у 100 мл крові
Коефіцієнт утилізації кисню	
- у стані спокою	30 %
- при інтенсивній діяльності	60...70 %

1	2
Тривалість затримки дихання	
- після глибокого вдиху (проба Штанге)	40...60 с
- після глибокого видиху (проба Генча)	30...40 с
- після гіпервентиляції	90...100 с

14. Енергетичний обмін та терморегуляція людини

Характеристика	Значення
1	2
Основний енергетичний обмін протягом доби	7118 кДж/г (1700 ккал/г)
Тепловіддача у стані спокою, %	
- шляхом радіації	Близько 60 %
- випаровування	20 %
- конвекції та виведення	14...20 %
Виділення води шляхом перспірації	600 мл за добу
Виділення поту за добу	
- середній показник	1,5 л
- максимальний показник	10...12 л
Теплові витрати на випаровування 1 мл води	2,42 кДж (0,58 ккал)

15. Інформація про систему травлення людини

Характеристика	Значення
1	2
<i>Слина</i>	
Кількість	500-2000 мл за 1 добу
Швидкість виділення	0,1...1,8 мл/хв
pH	5,8...7,36
Вміст води	99,14...99,42 %
Сухий залишок	0,5...0,6 %
Склад:	
- органічні речовини:	білки, амінокислоти, муцин, калікреїн тощо
- неорганічні речовини:	хлориди, карбонати, фосфати, солі натрію, калію тощо
- ферменти	α -амілаза, мальтоза, у слині міститься муцин, лізоцим (мурамідаса)
<i>Шлунковий сік</i>	
Кількість	2-3 л за 1 добу
Швидкість секреції	2-9 мл/хв
Відносна густина	1,004...1,01
Вміст води	99,4 %
pH	0,9...1,8
Концентрація HCl	0,4...0,5 %
<i>Сік підшлункової залози</i>	
Кількість	1200-2000 мл за 1 добу
Швидкість секреції	1,5 мл/хв
Відносна густина	1,005...1,014
pH	7,8...8,4

1	2
Вміст води	98,2...98,5 %
Сухий залишок	1,8...1,5 %
Склад:	
- органічні речовини:	білки, вуглеводи тощо
- неорганічні речовини:	бікарбонати, натрій, калій, хлориди
- ферменти (бб – 127 ммоль/л)	трипсин, хімотрипсин, карбоксипептидази, еластаза, ліпаза, фосфоліпаза, амілаза, мальтаза, лактаза, нуклеаза, фосфатаза, естераза
<i>Жовч</i>	
Добова кількість	500...1500 мл
Відносна густина	
- міхурова жовч	1,011...1,032
- печінкова жовч	1,008...1,015
рН	
- міхурова жовч	5,6...8,0
- печінкова жовч	6,2...8,5
Вміст води	
- міхурова жовч	85,9 %
- печінкова жовч	97,4 %
Сухий залишок	
- міхурова жовч	26 г/л
- печінкова жовч	33,5 г/л
<i>Сік тонкої кишки</i>	
Кількість	до 2500 мл на 1 добу
рН	7,2...8,6
Вміст води	97,5 %
Ферменти, що входять до складу:	сахараза, лактаза, ентерокиназа, ліпаза, фосфоліпаза, пептидази, нуклеази тощо
<i>Сік товстої кишки</i>	
Кількість	270-1550 мл за 1 добу
рН	8,5...9,0
Вміст води	86,4...93,9 %
Ферменти, що входять до складу:	пептидази, ліпаза, амілаза, нуклеази (у невеликій кількості)

16. Інформація про систему виділення людини

Характеристика	Значення
1	2
Кровообігання нирки	1000...1200 мл/хв
Тиск у капілярах клубочків	65...70 мм рт. ст.
Ефективний фільтраційний тиск	33 кПа (близько 25 мм рт. ст)
Плазмотік	600...650 мл/хв
Кількість первинної сечі	150-180 мл за 1 добу (близько 125 мл за 1 хв)

1	2
Реабсорбція	
проксимальна	80 %
дистальна	Приблизно 20 %
Кількість кінцевої сечі	1,0-1,5 л за 1 добу
pH	4,5-8,6 л за 1 добу
Відносна густина	1,010...1,025
Виділення сечовини	333-583 ммоль за 1 добу (20...30 г)
Виділення сечової кислоти	3,0-5,9 ммоль за 1 добу (0,5...1,0г)
Виділення загального азоту	428-1213 ммоль за 1 добу
Тиск у сечовому міхурі, що викликає позив до сечовипускання	12-16 см.вод.ст. (1,17...1,56 гПа)
Кількість сечі у сечовому міхурі	200...250 мл

17. Показники секреторної функції шлунка

Показник	Базальний	Після введення гістаміну	
		Субмакси – максимальний 0,008 мг/кг	Максимальний 0,024 мг/кг
1	2	3	4
Об'єм шлункового соку, мл	50...100	100-140	180-200
pH	1,4...1,8	1,25...1,3	1,14...1,1
Кислотність, ммоль/л			
- вільна	20...40	70...90	90...100
- загальна	28...48	78...98	98...108
Дебіт вільної HCL, моль/год	1...4	6,5...12	16...24
Кислотна продукція, ммоль	1,5...5,5	8...14	18...25
Концентрація пепсину, ммоль/л	0,6...1,1	1,4...1,9	1,4...2,1
Дебіт пепсину, ммоль/ год	0,03...0,11	0,14...0,26	0,26...0,46
Ферменти:	<ul style="list-style-type: none"> - пепсин (оптимум дії при pH 1,5-2,4) - гастринсин (оптимум дії при pH близько 3,0) - желатиназа, ліпаза, лізоцим 		

Навчальне видання

Антонюк Віктор Степанович
Тимчик Григорій Семенович
Бондаренко Максим Олексійович
Ващенко В'ячеслав Андрійович
Бондаренко Юлія Юріївна
Білокінь Світлана Олександрівна
Рубан Андрій Михайлович

Біофізика в задачах та прикладах

Навчальний посібник

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Темплан 2015 р., поз. 1-2-023

Підп. до друку 02.06.2015. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 12,09. Обл.-вид. арк. 20,11. Наклад 50 пр. Зам. № 15-115.

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел. (44) 406-81-78



ВПК «Політехніка»