

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Л.Є. Калашнікова, М.М. Сичик

БІОТЕРМОДИНАМІКА ТА МАСОПЕРЕНОС

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Медична інженерія»
спеціальності 163 «Біомедична інженерія»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент *Богомолів М.Ф.*, к.т.н., доц., доцент кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського,
Дубко А.Г., к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона

Відповідальний редактор *Зубчук В.І.*, к.т.н., доц., доцент кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
 (протокол № ____ від __.__.2021 р.)
 за поданням Вченої ради факультету біомедичної інженерії
 (протокол № 3 від 08.10.2021 р.)*

*Калашнікова Лариса Євгеніївна, канд. біолог. наук, доц.
 Сичик Марина Михайлівна, канд. техн. наук (PhD)*

БІОТЕРМОДИНАМІКА ТА МАСОПЕРЕНОС

«Біотермодинаміка та масоперенос»: навчальний посібник методичних матеріалів для самостійної роботи здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Медична інженерія» спеціальності 163 - «Біомедична інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. Л.Є. Калашнікова, М.М. Сичик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 64 с.

У навчальному посібнику розглянуто основні теоретичні основи біологічної термодинаміки, яка є кількісним дослідженням енергетичних трансдукцій, які відбуваються в або між живими організмами, структурами та клітинами та природою та функцією хімічних процесів, що лежать в основі цієї трансдукції. Теоретичні та практичні закони біотермодинаміки можуть бути використані при проектуванні та експлуатації медичних пристроїв. Практична частина спрямована на науково-аналітичний огляд, засвоєння фундаментальних законів термодинаміки в біологічних процесах, шляхом вирішення ситуативних тестових задач та розв'язання кількісних задач з біотехнічних систем, пов'язаних з безперервним обміном речовинним, енергетичним та інформаційним із навколишнім середовищем, перетворення одних видів енергії на інші, як, наприклад, у разі теплопровідності в біологічній тканині при дії впливу фізіотерапевтичного чи хірургічного обладнання, процесів м'язового скорочення, передачі нервового імпульсу, зорового та слухового сприйняття, гемодинамічних процесів та ін.

© Л.Є. Калашнікова, М.М. Сичик 2021
 © КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ВЕЛИЧИНИ БІОТЕРМОДИНАМІКИ.....	5
2. ЗВОРОТНІ ТА НЕЗВОРОТНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ. ПОНЯТТЯ ПРО СТАН СИСТЕМИ.....	9
3. ОСОБЛИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ.....	13
4. ОСНОВНІ ПОСТУЛАТИ (ПОХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ) ТЕРМОДИНАМІКИ І БІОТЕРМОДИНАМІКИ	14
5. ПЕРШИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ.....	15
6. ЖИВІ ОРГАНІЗМИ ТА ПЕРШИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ.....	17
7. ФОРМУЛЮВАННЯ ПЕРШОГО ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ЖИВИХ СИСТЕМ.....	18
8. ЕНТАЛЬПІЯ. ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ РЕАКЦІЇ.....	19
9. САМОЧИННІ ПРОЦЕСИ.....	26
10. ЕНТРОПІЯ. ТЕРМОДИНАМІЧНА ІМОВІРНІСТЬ. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ.....	27
11. ВІЛЬНА ЕНЕРГІЯ ГІБСА.....	34
12. ПОНЯТТЯ ГРАДІЄНТА.....	35
13. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ЗАКРІПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ	37
ЗАГАЛЬНИЙ СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	66

ВСТУП

Існування будь-якого живого організму пов'язане з безперервним обміном речовинним, енергетичним та інформаційним із навколишнім середовищем. Енергія, яка надходить у систему витрачається на синтез біоенергетичних сполук на підтримку хімічних, астматичних та електричних потенціалів, а також їх градієнтів. У процесі життєдіяльності відбувається безперервне перетворення одних видів енергії на інші. Необхідно використовувати термодинаміку, як науку, що вивчає найбільш загальні закономірності перетворень різних видів енергії. Біологічна термодинаміка є кількісним дослідженням енергетичних трансдукцій, які відбуваються в або між живими організмами, структурами та клітинами та природою та функцією хімічних процесів, що лежать в основі цієї трансдукції. Біологічна термодинаміка може вирішити питання про те, чи є вигоди, пов'язані з будь-яким конкретним фенотипічним ознакою коштує енергії інвестицій він вимагає.

Біологічна термодинаміка зосереджена на принципах хімічної термодинаміки в біології та біохімії. Термодинамічний підхід є основою фізико-хімічного аналізу метаболічних процесів як в біології та біофізиці, так і в біотехнології. потрібному напрямі. Це вимагає обміну речовиною та енергією з навколишнім середовищем, перетворення одних видів енергії на інші, як, наприклад, у разі процесів м'язового скорочення, передачі нервового імпульсу, зорового та слухового сприйняття та ін. Вивченням цих питань займається термодинаміка, закони якої справедливі для неживої, і живої природи.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ВЕЛИЧИНИ БІОТЕРМОДИНАМІКИ

Термодинаміка – це наука, вивчаюча взаємні переходи теплоти і роботи в рівноважних системах і при переході до рівноваги.

Біотермодинаміка – це розділ біофізичної хімії, в якому термодинамічні методи (загальна термодинаміка) застосовуються для аналізу хімічних і фізико-хімічних явлень: хімічних реакцій, фазових переходів і процесів в біологічних об'єктах.

Біотермодинаміка базується на розділі фізичної хімії, котрий називається хімічною термодинамікою. У термодинаміці використовують параметри розрахунку, які відомі з експерименту – дані про початковий і кінцевий стан системи та умови, в яких протікає хімічний процес (температура, тиск і т. д.). Слід особливо підкреслити, що серед понять класичної термодинаміки немає поняття часу, т.ч. класична термодинаміка вивчає стан, а не процеси. Через цю причину термодинаміка нічого не говорить про те, з якою швидкістю здійснюється перехід з одного стану в інше. В класичній термодинаміці час відсутній. Він вводиться в нерівноважній термодинаміці, або термодинаміці незворотніх процесів. Зв'язок термодинаміки з біохімічними процесами становить предмет біохімічної термодинаміки, який вивчає співвідношення між різними видами енергії біохімічних процесів та іншими, пов'язаними з цими питаннями змін; вона досліджує можливість, направлеість, межі мимовільного протікання біохімічних процесів в даних умовах і умови рівноваги.

Обмеженість термодинамічного методу полягає в тому, що біотермодинаміка не дозволяє робити які-небудь висновки про внутрішню будову речовин, а також механізм і швидкість процесів протікання в біологічних системах.

Об'єкт вивчення термодинаміки – термодинамічні системи. Об'єктами

вивчення термодинаміки є система, яка перебуває у певному енергетичному стані та має певний фазовий склад, і термодинамічний процес.

Термодинамічна система (або просто **система**) – це сукупність взаємодіючих речовин, які уявно або фактично відокремлені від навколишнього середовища.

Фаза – це гомогенна частина системи, що характеризується однаковими фізичними і хімічними властивостями та складом і відокремлюється від інших частин системи поверхнею поділу, при переході через який відбувається стрибкоподібне зміння властивостей.

Термодинамічні системи (або просто системи) прийнято класифікувати за різними ознаками.

За характером взаємодії з навколишнім середовищем системи бувають:

- **ізолювана система**, в якій відсутні енергообмін і масообмін з навколишнім середовищем. У грубому наближенні як приклад ізолюваної системи можна навести термос (рис. 1) – за умови щодо спостереження за ним ведеться дуже короткий проміжок часу;



Рис. 1 – Приклади умовно ізолюваних системи

- **закрита система**, що обмінюється з навколишнім середовищем лише енергією (рис.2);



Рис. 2.– Приклади закритих систем

- **відкрита система, або незамкнута**, яка обмінюється з навколишнім середовищем і речовиною, і енергією (рис.3).



Рис. 3 – Приклади відкритих систем

За фазовим складом системи поділяються на:

- гомогенна система**, що містить тільки одну фазу, наприклад, суміш газів, однорідний розплав солей чи розчин (рис. 4);

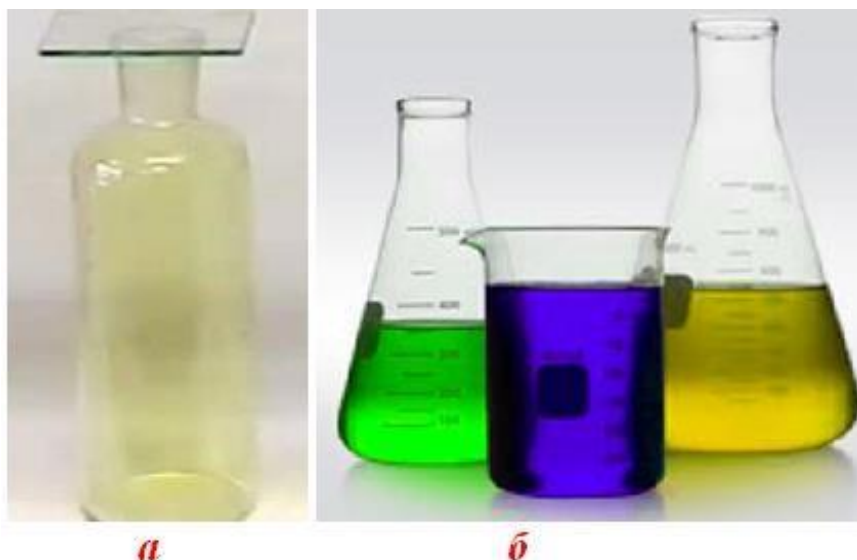


Рис.4. – Приклади гомогенних систем:

а) суміш газів;

б) водні розчини індивідуальних солей

в. *гетерогенна система*, яка складаються з декількох фаз, відокремлених одна від одної поверхнею поділу (рис. 5), наприклад, лід і рідка вода, рідина та її пара, дві рідини, що не змішуються між собою: вода і газ.

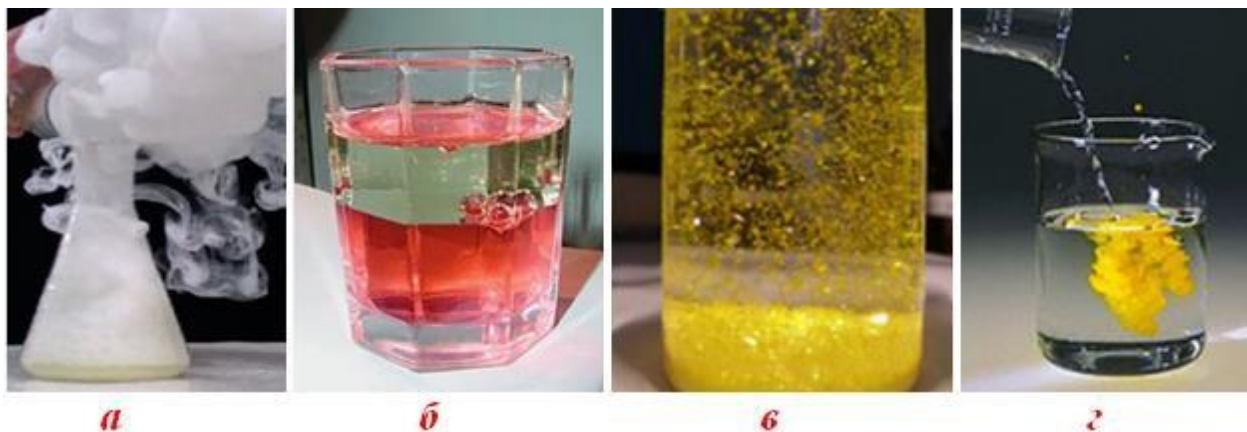


Рис. 5. – Приклади гетерогенних систем:

а) рідина-газ; б) рідина-рідина; в) газ-тверда фаза; г) рідина-тверда фаза

Стан системи описується за допомогою фізичних величин, які називаються термодинамічними параметрами.

Термодинамічні параметри – це певні характеристики, що мають важливі відмінні ознаки: змінення їх величин приводить до зміни стану всієї системи.

Термодинамічні параметри, як і більшість фізичних величин, можуть бути інтенсивними чи екстенсивними.

Інтенсивні параметри – це характеристики, значення яких не залежить від розміру системи, наприклад, температура, густина, концентрація, тиск.

При розділенні системи на декілька підсистем, у кожній зберігається однакове значення термодинамічного параметру.

Екстенсивні параметри – це термодинамічні параметри, що залежать від розміру системи. Їх значення є адитивною величиною, оскільки складається з суми відповідних значень окремих підсистем, наприклад: маса, об'єм, кількість речовини, потужність.

2. ЗВОРОТНІ ТА НЕЗВОРОТНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ. ПОНЯТТЯ ПРО СТАН СИСТЕМИ

Термодинамічний процес називається будь-яка зміна в системі, пов'язана зі зміною хоча б одного з термодинамічних параметрів.

Якщо в результаті процесу стан системи не змінюється, такий процес називається **зворотнім**

І навпаки, якщо в результаті процесу система не повернеться у вихідний стан, такий процес називається **незворотнім**.

Зворотній процес - процес переходу термодинамічної системи з одного стану в інший, що дозволяє можливість повернення її в початковий стан через ту ж послідовність проміжних станів, але прохідних у зворотному порядку. Для того щоб процес був зворотній, він повинен бути таким повільним, щоб його можна було розглядати як безперервний ряд рівноважних станів, тобто він

повинен бути повільним у порівнянні з процесами встановлення рівноваги термодинамічної в даній системі. Строго кажучи, зворотній процес характеризується нескінченно повільною зміною термодинамічних параметрів (щільності, тиску, температури та ін), що визначають рівновагу системи. Такі процеси називаються також квазістатичними або квазі рівноважними. Оборотність квазірівноважного процесу випливає з того, що його будь-який проміжний стан є стан термодинамічної рівноваги і тому воно не чутливе до того, чи йде процес у прямому або зворотному напрямку.

Незворотні термодинамічні процеси називають такі процеси, які можуть мимовільно протікати тільки в одному певному напрямку. До них відносяться: процеси дифузії, теплопровідності, термодифузії, в'язкої течії, розширення газу в порожнечу і т.п. Усі вони є нерівноважними процесами.

У відкритих системах (які можуть обмінюватися енергією або речовиною з навколишнім середовищем) при незворотних процесах ентропія може залишатися постійною або навіть зменшуватися за рахунок обміну ентропією із зовнішнім середовищем.

*Перехід системи із одного стану в інший, при якому змінюються термодинамічні параметри, – це **термодинамічний процес**.*

Щоб не порушувалася термодинамічна рівновага системи з навколишнім середовищем, процес повинний здійснюватися дуже повільно, а в ідеалі – нескінченно довго. При цьому можуть змінюватися всі або окремі параметри системи. Залежно від сталості певних параметрів термодинамічні процеси поділяються на типи:

- *ізобаричні процеси* ($P = \text{const}$, $\Delta P = 0$);
- *ізохоричні процеси* ($V = \text{const}$, $\Delta V = 0$);
- *ізотермічні процеси* ($T = \text{const}$, $\Delta T = 0$);
- *адіабатичні процеси* ($Q = \text{const}$, $\Delta Q = 0$).

При сталості двох параметрів процес належить до *комбінованих*;

це відбивається в його назві, наприклад, ізобарно-ізотермічний процес, якщо $P, T = \text{const}$.

Термодинамічні властивості системи виражаються за допомогою спеціальних залежностей, які називаються **функція стану** (або **характеристична функція**, або **термодинамічна функція**), які мають *дві основні особливості*:

- їх значення не залежать від способу (або шляху) досягнення даного стану системи, а визначаються лише станом самої системи, який описується за допомогою термодинамічних параметрів. Тому змінення термодинамічних функцій) дорівнює різниці між значеннями термодинамічних параметрів у кінцевому і вихідному станах системи (змінення позначають грецькою буквою Δ – дельта);

- значення характеристичних функцій залежать від кількості (або маси) речовини, тому їх відносять до одного моля речовини.

Найчастіше застосовуються такі характеристичні функції:

- **внутрішня енергія U ,**
- **ентальпія H , ентропія S**
- **та енергія Гіббса G .**

Функціями процесу називають термодинамічні функції, значення яких залежить від шляху, яким відбувається зміна системи (приклад – теплота Q , робота W).

Усі термодинамічні властивості систем суворо визначені лише у рівноважних станах. Але у природі є ряд інших станів, у яких параметри системи впливають на їх існування.

Розрізняють стаціонарний, рівноважний і нерівноважний стан.

Стаціонарним станом називається стан системи, при якому параметри системи постійні в кожній її точці, але в системі є потоки (наприклад, маси або енергії).

Рівноважним станом називається стан системи, при якому параметри системи є постійними і немає потоків.

Система може перебувати в термодинамічній рівновазі або стаціонарному стані. У стані термодинамічної рівноваги у системі припиняються всі процеси, крім теплового руху молекул, відповідно вирівнюються всі градієнти, що з живого організму означає загибель. У стаціонарному стані йдуть хімічні реакції, дифузія, перенесення іонів та інші процеси, але вони такі збалансовані, що стан системи загалом не змінюється. Є градієнти, які мають постійні значення

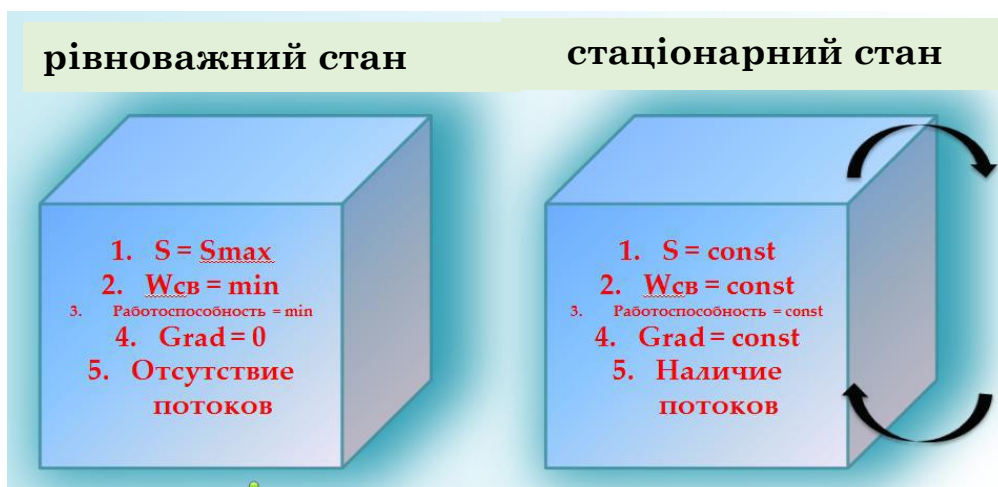


Рис.6. Порівняльна схема стаціонарного та рівноважного стану

Нерівноважним (нестійким) станом називається стан системи, при якому будь-яка нескінченно мала дія спричиняє кінцеву зміну стану системи, яка не зникає при усуненні цієї дії.

Термодинамічна рівновага - стан термодинамічної системи, в який вона мимовільно приходить через досить великий проміжок часу в умовах ізоляції від навколишнього середовища, після чого параметри стану системи вже не змінюються з часом.

При термодинамічній рівновазі можливість системою виконувати роботи дорівнює нулю, а ентропія максимальна.

Зміна будь-якого параметра системи – зміна стану. При цьому перехід системи з одного стану в інший може бути результатом процесів:

3. ОСОБЛИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Кожна клітина і весь живий організм в цілому є відкритими системами, і лише в окремих частинах клітини є умови для існування закритих та ізольованих систем. Процеси, які у біосистемах, як й у будь-яких інших системах, необоротні (неравновесні/нерівноважні), тобто за переході системи з одного стану до іншого зворотний перехід у початковий стан неможливий без додаткового припливу енергії ззовні.

Фундаментальним поняттям класичної термодинаміки є рівноважний стан системи, в якому термодинамічні параметри (обсяг, тиск, температура та ін.) мають однакове значення у всіх точках системи та не можуть змінюватися мимовільно у часі.

Рівноважний стан для живого організму неприпустимо, тому що в цьому випадку неможливе протікання жодних спрямованих процесів, крім випадкових відхилень від положення рівноваги.

При застосуванні термодинаміки до біологічних систем необхідно враховувати особливості організації живих систем:

- 1) біологічні системи відкриті для потоків речовини та енергії;
- 2) процеси в живих системах, зрештою, мають необоротний характер;
- 3) живі системи далекі від рівноваги;
- 4) біологічні системи гетерофазні, структуровані, і окремі фази можуть мати невелику кількість молекул.

Тому у термодинаміці біологічних процесів основним поняттям є стаціонарний стан системи.

На відміну від термодинамічної рівноваги, стаціонарний стан, як відомо, характеризується

1. Постійним припливом речовин у систему та видаленням продуктів обміну;
2. Постійною витратою вільної енергії, яка підтримує сталість

концентрацій речовини в системі;

3. Сталістю термодинамічних параметрів (включаючи внутрішню енергію та ентропію) системи, що перебуває у стаціонарному стані – параметри не змінюються з часом, але можуть відрізнятися у різних частинах системи, тобто в таких системах існують і постійно підтримуються градієнти параметрів;

4. У стаціонарному стані відкрита система може існувати лише за рахунок потоків речовини та електричних зарядів.

4. ОСНОВНІ ПОСТУЛАТИ (ПОХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ) ТЕРМОДИНАМІКИ І БІОТЕРМОДИНАМІКИ

Усі висновки та співвідношення термодинаміки засновані на трьох основних постулатах (вихідних положеннях) та трьох законах (початках), які є узагальненням експериментальних даних і не можуть бути виведені з більш загальних аксіом.

Перший основний постулат термодинаміки: Будь-яка ізольована система з часом приходить у рівноважний стан і самовільно не може вийти з нього.

Цей постулат обмежує розмір систем, що підкоряються термодинамічним законам. Так, наприклад, системи астрономічного масштабу не можна розглядати як ізольовані, вони не підпорядковуються класичній термодинаміці внаслідок наявності далекодіючої гравітаційної взаємодії. З іншого боку, мікроскопічні системи можуть мимовільно виходити зі стану рівноваги; це явище називається флуктуаціями. Нижню межу для кількості частинок у термодинамічній системі, вище якої наявністю флуктуацій можна знехтувати - $\sim 10^{18}$ частинок.

Другий основний постулат термодинаміки, який іноді називають нульовим початком (законом) термодинаміки: Якщо система А знаходиться в

тепловій рівновазі із системою В, а та в свою чергу, знаходиться в рівновазі із системою С, то системи А та С також знаходяться у тепловій рівновазі.

Цей постулат говорить про існування особливої інтенсивної змінної, що характеризує стан теплової рівноваги та звану температуру. Системи, що знаходяться в тепловій рівновазі, мають однакову температуру. Отже, нульовий закон термодинаміки – це постулат існування температури.

Третій основний постулат термодинаміки: При заданих зовнішніх змінних енергія рівноважної системи є монотонною функцією її температури.

5. ПЕРШИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ,

Перший початок (закон) термодинаміки – це закон збереження енергії у застосуванні до теплових процесів: Енергія ізольованої системи постійна.

У неізольованій системі внутрішня енергія збільшується за рахунок теплоти, що підводиться до системи, та зменшується за рахунок роботи, що проводиться системою над навколишнім середовищем.

Таким чином, найбільш поширене формулювання першого початку термодинаміки:

Отримана ззовні теплота Q витрачається на збільшення внутрішньої енергії ΔU і роботу A , що здійснюється системою

$$Q = \Delta U + A$$

АБО

$$\Delta U = Q - A .$$

Внутрішня енергія є функцією стану системи. Робота і теплота є функціями стану, а залежить від шляху процесу (є функціями процесу)

Сенс першого початку термодинаміки зводиться до того що зміна внутрішньої енергії системи (U) може статися під час обміну енергією з довкіллям. Енергетичний обмін між системою та середовищем здійснюється двома способами - за допомогою передачі тепла (Q) та шляхом виконання роботи (A).

Внутрішня енергія U – це функція стану, яка складається з усіх видів енергії системи (енергії руху та взаємодії молекул, атомів, ядер та інших частинок), за винятком кінетичної енергії руху системи як єдиного цілого і потенціальної енергії її положення.

Внутрішня енергія залежить тільки від стану системи, тому неможливо виміряти її абсолютне значення, однак можна встановити її змінення ΔU при переході системи з одного стану в інший:

$$\Delta U = U_2 - U_1,$$

де U_2 і U_1 – відповідно внутрішня енергія у кінцевому і початковому станах. Вимірюється внутрішня енергія у [кДж/моль].

Значення ΔU додатне ($\Delta U > 0$), якщо внутрішня енергія системи зростає ($U_2 > U_1$), і від'ємне ($\Delta U < 0$) при зменшенні внутрішньої енергії системи ($U_2 < U_1$).

Між термодинамічною системою та навколишнім середовищем може відбуватися обмін енергією у вигляді теплоти і роботи.

Теплота Q – це енергія, що передається від одного тіла до іншого при безпосередньому контакті і залежить тільки від їх температур, але не пов'язана з перенесенням речовини.

Теплота, одержана системою, називається підведеною і вважається додатною ($Q > 0$). І навпаки, віддана системою теплота називається відведеною і вважається від'ємною ($Q < 0$).

Теплота Q є кількісною мірою хаотичного руху частинок даної системи, а робота A

– кількісною мірою напрямленого руху частинок, або мірою енергії, що передається від однієї системи до іншої за рахунок переміщення речовини під дією певних сил (наприклад, гравітаційних).

Робота A – це енергія, що передається одним тілом іншому при їх взаємодії, не залежить від температури цих тіл і не пов'язана з передаванням теплоти.

Додатною вважаються робота ($A > 0$), що виконується системою

проти дії зовнішніх сил, а від'ємною ($A < 0$) – робота, яку навколишнє середовище виконує щодо системи.

Теплота і робота вимірюються у кілоджоулях [кДж].

На відміну від внутрішньої енергії U *теплота Q і робота A залежать від способу проведення процесу*, тому вони *не належать до характеристичних функцій*.

Співвідношення між зміненням внутрішньої енергії ΔU , теплотою Q і роботою A встановлює **перший закон термодинаміки**:

теплота, підведена до системи, витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи і на її роботу над навколишнім середовищем

$$Q = \Delta U + A$$

Перший закон термодинаміки є вираженням універсального закону збереження енергії, згідно з яким енергія не може виникати нізвідкіль і зникати нікуди, однак може перетворюватися з однієї форми на іншу.

6. ЖИВІ ОРГАНІЗМИ ТА ПЕРШИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ

Оскільки всі без винятку життєві процеси пов'язані з перетвореннями енергії у живих організмах, термодинаміка має значення й у біологічних науках; у цьому плані говорять про біологічну термодинаміку.

(Перший початок термодинаміки - Являє собою закон збереження енергії.)

Він говорить, що енергія не може бути створена або знищена, вона лише переходить з одного виду до іншого в різних фізичних процесах.

Звідси випливає, що внутрішня енергія ізольованої системи залишається незмінною.

У разі закритих систем зміна внутрішньої енергії системи (ΔU) може відбуватися двома способами:

- 1) шляхом здійснення роботи (A) системою або над системою;
- 2) за допомогою передачі тепла (Q).

$$\Delta U = Q - A \text{ або } Q = \Delta U + A$$

(Тепло, передане системі, йде на зміну внутрішньої енергії та здійснення роботи). Знаки «+» або «-» відповідають правилу знаків:

- +Q – тепло, що надходить у систему;
- -Q – тепло, яке віддається системою;
- +A – робота, що здійснюється системою над оточуючими тілами;
- -A – робота, що здійснюється навколишніми тілами над системою.

7. ФОРМУЛЮВАННЯ ПЕРШОГО ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ЖИВИХ СИСТЕМ

Усі види роботи, що здійснюються в живому організмі, здійснюються за рахунок енергії АТФ.

АТФ – універсальне джерело енергії.



Перший закон термодинаміки повністю застосовний до живих організмів.

Для живих систем він формулюється так:

Усі види робіт в організмі здійснюються за рахунок еквівалентної кількості енергії, що виділяється при окисленні поживних речовин.

Організм теплокровних тварин має постійну температуру і хімічний склад його в середньому не змінюється, тому $\Delta U = 0$.

Досвідчена перевірка застосування першого закону для живих систем проводилася в спеціальних біокалориметрах, де вимірювалася теплота, виділена організмом у процесах метаболізму, при випаровуваннях, а також разом із продуктами виділення.

Виявилося, що виділена організмом теплота повністю відповідає енергії, поглиненій разом із поживними речовинами.

Справедливість першого закону термодинаміки для живих систем означає, що сам собою організм не є незалежним джерелом будь-якої нової енергії.

8. ЕНТАЛЬПІЯ. ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ РЕАКЦІЇ

При біохімічних перетвореннях відбувається зміна внутрішньої енергії системи, обумовлена тим, що внутрішня енергія продуктів реакції відрізняється від внутрішньої енергії речовин, що прореагували.

Тепловим ефектом біохімічної реакції називається теплота, що виділяється або поглинається в результаті реакції - це величина хімічної енергії, або ентальпія, і позначається буквою H (від грецького слова «нагріваю»). Ентальпія залежить лише від внутрішньої енергії U і від P та V , що є параметрами стану системи. Ентальпію називають тепловмістом системи.

При $P = \text{const}$ $dQ = dH$, тобто ентальпія – це функція, що визначає перетворення хімічної енергії на тепло і вказує кількість енергії, яку можна перетворити на теплоту

Ентальпія H – це функція стану, що за умов постійного тиску характеризує внутрішню енергію системи та її здатність до виконання роботи.

Ентальпія залежить від кількості речовини, тому її змінення ΔH відносять до одного моля і вимірюють у [кДж/моль].

При підстановці $H = U + P \cdot V$ у рівняння (3.3) одержуємо:

$$Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H.$$

Отже, в ізобаричному процесі (за умови $P = \text{const}$) підведена теплота дорівнює зміні ентальпії системи.

Змінення ентальпії ΔH системи внаслідок взаємодії речовин за умов

постійного тиску називається **тепловий ефект хімічної реакції**.

Перший закон термодинаміки та його наслідок можна застосувати до біологічних об'єктів, при цьому враховується кількість енергії, поглиненої з їжею, та кількість виділеної організмом теплової енергії.

У цьому енергетичному балансі не розглядаються проміжні етапи перетворення енергії.

Перший закон характеризує лише кількісні зміни та перетворення енергії в термодинамічних системах, але не показує ймовірності процесу та його спрямованості.

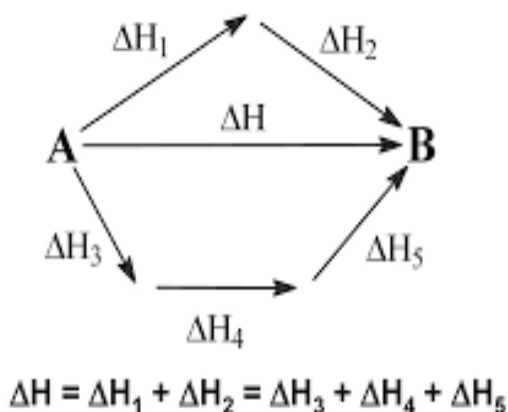
При біохімічних перетвореннях відбувається зміна внутрішньої енергії системи, обумовлена тим, що внутрішня енергія продуктів реакції відрізняється від внутрішньої енергії речовин, що прореагували.

Тепловим ефектом біохімічної реакції називається теплота, що виділяється або поглинається в результаті реакції при дотриманні наступних умов:

- 1) об'єм або тиск постійні ($p = \text{const}$ або $V = \text{const}$);
- 2) не відбувається жодної роботи, крім роботи розширення;
- 3) температура вихідних речовин і продуктів однакова ($T_1 = T_2$).

Закон Гесса.

Тепловий ефект реакції, що протікає при постійному тиску або постійному об'ємі, не залежить від шляху реакції, а визначається лише станом вихідних речовин та продуктів реакції.



Термодинамічна основа закону Гесса - незалежність теплового ефекту хімічної реакції від способу проведення.

- Закон Гесса – наслідок I початку термодинаміки.

Тепловий ефект ізобарної реакції дорівнює приросту ентальпії системи

$$Q_p = \Delta H.$$

Відповідно до загального правила знаків (позитивною вважається теплота, що підводиться до системи) позитивним буде тепловий ефект ендотермічної реакції (що протікає з поглинанням теплоти), а негативним буде тепловий ефект екзотермічної реакції (що протікає з виділенням теплоти).

Значення закону Гесса полягає в тому, що він дозволяє теоретично, не вдаючись до експерименту, розраховувати значення теплових ефектів біохімічних реакцій

Згідно з першим законом термодинаміки теплота реакції Q не є функцією стану, оскільки залежить від способу проведення процесу, тобто від шляху переходу системи із початкового у кінцевий стан. Однак у двох випадках теплота набуває ознак характеристичної функції.

*Якщо вихідні речовини і продукти реакції перебувають у стандартному стані, то тепловий ефект реакції називається **стандартна ентальпія хімічної реакції** ΔH^0* 298

Стандартні умови – це: $T=298K$ (або $t=25^\circ C$) і $P=101325Pa$, а стандартні стани речовин наведені у табл. 1. Необхідно пам'ятати, що **стандартні стани речовин** не залежать від температури.

Стан речовини	Ознаки стандартного стану речовин
Проста тверда речовина	Кристалічний стан
Проста рідка речовина	Хімічно чиста рідина
Газоподібна речовина	Парціальний тиск $10^5 Pa$
Розчинена речовина	Концентрація 1 моль/л

Рис. 7. Характеристика стану речовини.

Для більшості хімічних реакцій змінення теплового ефекту звичайно є відносно невеликим, тому для його розрахунків можна знехтувати залежністю ΔH від температури і вважати тепловий ефект реакції постійним, тобто $\Delta H_T \sim \Delta H^0_{298}$.

Якщо у результаті реакції ентальпія системи зменшується ($H_2 < H_1$, $\Delta H < 0$), то зрозуміло, що теплота виділяється в навколишнє середовище, тобто перебігає **екзотермічний процес**. І навпаки, збільшення ентальпії системи ($H_2 > H_1$, $\Delta H > 0$) внаслідок хімічної реакції свідчить про поглинання системою теплоти з оточуючого середовища, тобто про **ендотермічний процес** (Рис. 8).

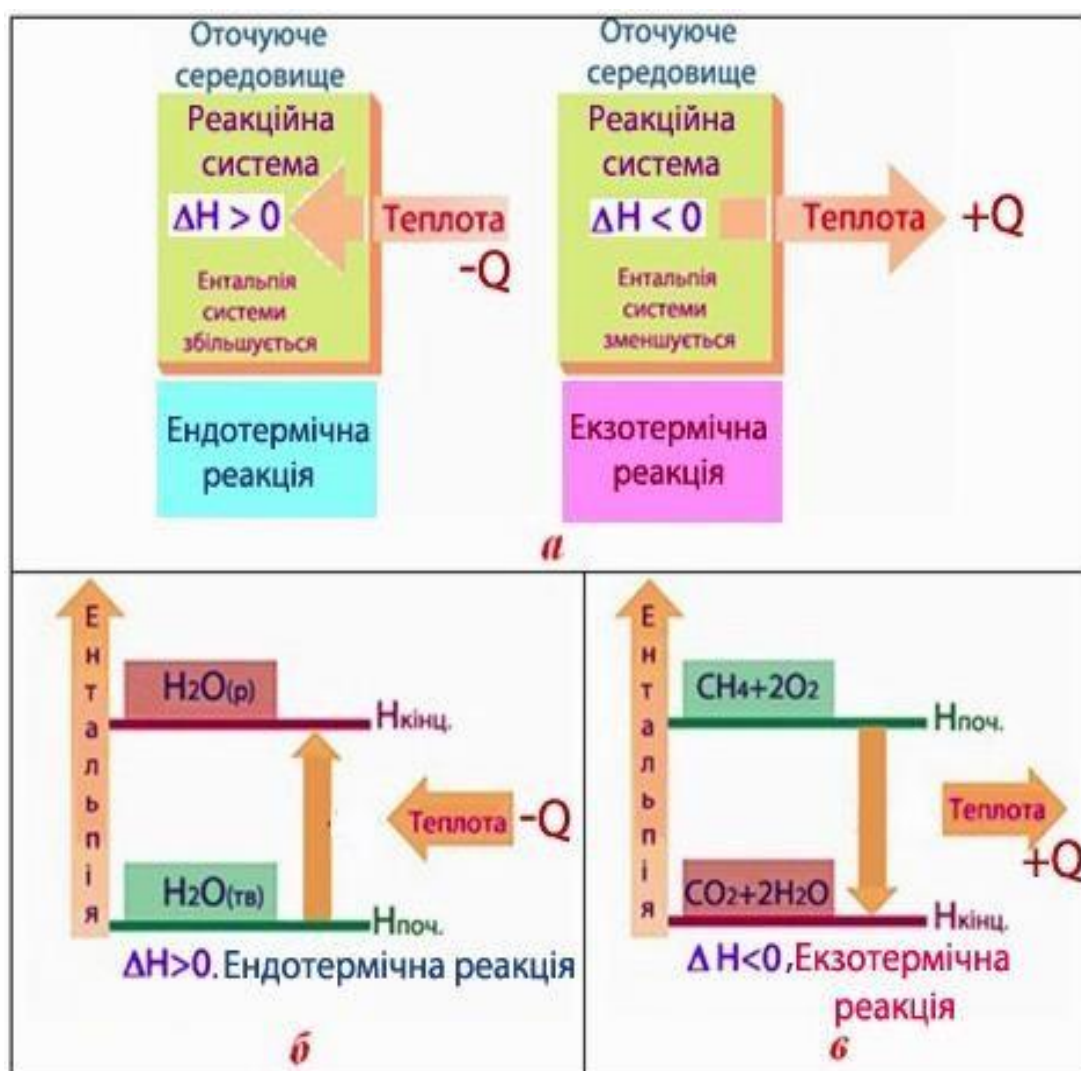


Рисунок 8. – Ендо- і екзотермічні реакції: а) співвідношення між знаком теплоти ($\pm Q$) і змінення ентальпії ($\pm \Delta H$); б) ендотермічний процес фазового перетворення $H_2O_{(тв)} \rightarrow H_2O_{(р)}$; в) екзотермічна реакція $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Ентальпію хімічної реакції $\Delta H_{\text{х.р.}}$ не слід ототожнювати з теплотою Q , незважаючи на те, що їх чисельні значення можуть співпадати.

Величина Q вказує на кількість теплоти, що виділилася у навколишнє середовища ($+Q$) чи поглинулася з нього ($-Q$) під час реакції за будь-яких умов і при довільній кількості речовини. На відміну від теплоти Q ентальпія ΔH_{T} віднесена чітко до 1 моль речовини за ізобаричних умов ($P = \text{const}$).

Іншою суттєвою відмінністю є знак («+» чи «-») перед величинами Q і ΔH . Величина $\Delta H_{\text{х.р.}}$ характеризує тепловий стан реакційної системи, а Q – оточуючого середовища. Екзотермічні реакції супроводжуються виділенням теплоти, отже тепловміст у системі зменшується ($\Delta H_{\text{продуктів}} < \Delta H_{\text{реагентів}}$, $\Delta H_{\text{х.р.}} < 0$), а в оточуючому середовищі, навпаки, – зростає ($+Q$). А при ендотермічних реакціях спостерігається зворотна залежність: за рахунок поглинання теплоти з оточуючого середовища ентальпія системи зростає ($\Delta H_{\text{продуктів}} > \Delta H_{\text{реагентів}}$, $\Delta H < 0$), а теплота у середовищі, навпроти, зменшується ($-Q$) (рис. 9). Очевидно, що для обох випадків кількість теплоти і ентальпія реакції мають протилежні знаки, тому можна вивести залежність.

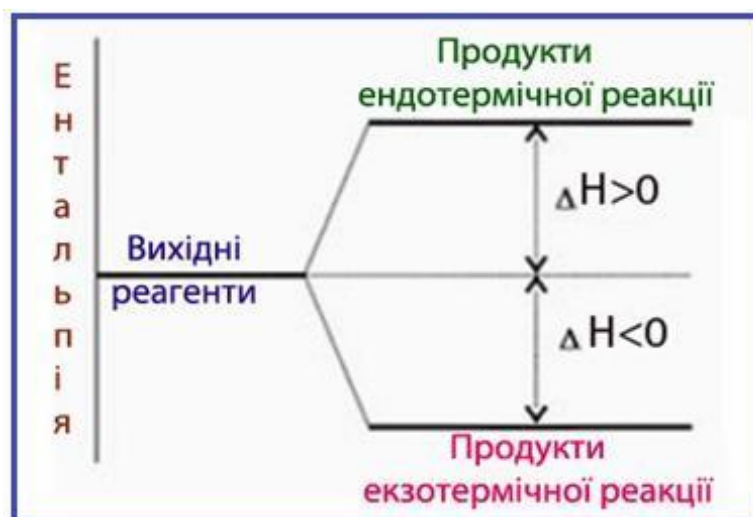


Рисунок 9. – Змінення ентальпії внаслідок екзо- і ендотермічної реакції

На тепловий ефект реакції впливає декілька чинників, у тому числі:

- Агрегатний (чи фазовий) стан вихідних речовин і продуктів реакції;

- Температура. Для хімічних реакції змінення теплового ефекту в межах температур і тисків, що мають практичне значення, відносно невелике, тому для не дуже точних розрахунків можна знехтувати залежністю ΔH від температури і вважати тепловий ефект реакції постійним.

- Умови перебігу реакції – при сталому тиску чи при сталому об'ємі.

Тепловий ефект утворення 1 моль речовини із простих сполук називається **ентальпія утворення речовини**, або **теплота утворення речовини**.

Ентальпію утворення простих речовин, стійких за умов 298K і 10^5 Па, вважають такою, що дорівнює нулю.

Значення стандартних ентальпій утворення ($\Delta H_{f,298}^0$) для декількох тисяч сполук наводяться у термохімічних довідниках.

Згідно з законом Гесса тепловий ефект утворення CO_2 з простих речовин дорівнює сумарному тепловому ефекту утворення CO_2 через проміжну стадію:

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2.$$

Із закону Гесса випливають важливі наслідки.

Перший наслідок закону Гесса: тепловий ефект зворотної реакції дорівнює тепловому ефекту прямої реакції, взятому з протилежним знаком

$$\Delta H_{\text{пр}} = -\Delta H_{\text{зворотн.}}$$

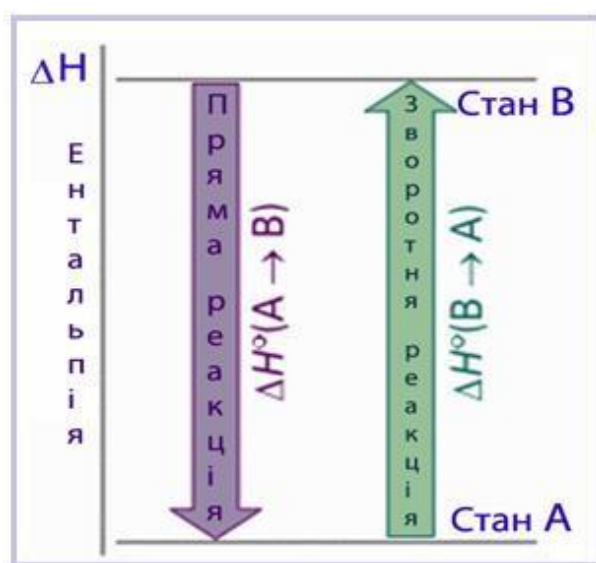
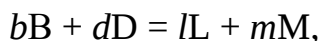


Рисунок 10. – Перший наслідок закону Гесса

Закон Гесса доводить, що яким би шляхом не перебігала реакція, її тепловий ефект буде однаковим, якщо при цьому не змінюється кінцевий і вихідний стани системи.

Другий наслідок закону Гесса: ентальпія хімічної реакції дорівнює сумі ентальпій утворення продуктів реакції за винятком суми ентальпій утворення вихідних речовин з урахуванням відповідних стехіометричних коефіцієнтів.

Другий наслідок закону Гесса дає можливість розрахувати ентальпію хімічної реакції. Для реакції загального вигляду



На основі закону Гесса можна розрахувати **ентальпія утворення** будь-якої речовини, якщо відомі ентальпії утворення усіх інших речовин і ентальпія хімічної реакції.

Оскільки ентальпія хімічної реакції є наслідком руйнування одних хімічних зв'язків і утворення інших, то за відомими значеннями енергії хімічних зв'язків легко обчислити ентальпію хімічної реакції або за відомою ентальпією – енергію зв'язку.

Перебіг хімічних реакцій дуже часто супроводжується фазовими чи поліморфними перетвореннями, які теж характеризуються власними енергетичними ефектами. Процеси переходу твердого тіла у рідину (плавлення) і газ (сублімація), рідини у газ (пароутворення), кристалічного стану в аморфний, менш стійкої модифікації у більш стійку є ендотермічними. Зворотні процеси – кристалізації, конденсації, переходу аморфного стану до кристалічного – протікають екзотермічно. Теплові ефекти фазових та поліморфних перетворень, як правило, суттєво менші, ніж теплові ефекти хімічних реакцій.

Застосування закону Гесса надзвичайно поширює можливості термохімії, дозволяючи виконувати точні розрахунки ентальпій утворення цілого ряду речовин, дослідні дані для яких важко було одержати з технічних причин. На основі закону Гесса обчислюються термодинамічні функції, що використовуються у безлічі термохімічних і термодинамічних розрахунків.

9. САМОЧИННІ ПРОЦЕСИ

При вивченні хімічних процесів надзвичайно важливо оцінити принципову можливість чи неможливість їх перебігу, а також напрямок і межі самочинного перебігу реакцій за даних умов.

Самочинні процеси – це такі змінення у системі, що відбуваються без підведення енергії ззовні (тобто без здійснення роботи над системою).

Як приклади самочинних фізичних процесів можна навести передавання теплоти від нагрітого тіла холодному (рис. 11 а), здатність молекул газу займати весь об'єм посудини (рис. 11 б), а приклади хімічних реакцій – утворення іржі на металах, розчинення солі у воді тощо.

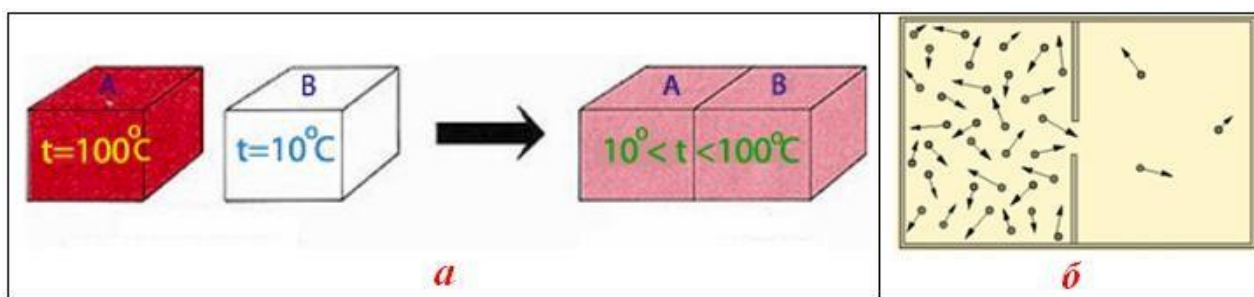


Рис.11.– Самочинні фізичні процеси:

- а) передача теплоти від гарячого тіла холодному і вирівнювання температури при контакті обох тіл;
- б) самочинне розповсюдження молекул газу по всьому об'єму посудини

Рушійними силами самочинного перебігу процесів є два фактори:

- прагнення системи до мінімуму енергії;
- прагнення до досягнення найбільш імовірного за даних умов стану.

Перший чинник, який одержав назву **ентальпійний фактор**, виявляється у зміні ентальпії. Це пояснюється так: під час будь-якої хімічної реакції відбувається розрив зв'язків у молекулах вихідних реагентів, який потребує витрати енергії, і одночасно – утворення нових зв'язків у молекулах продуктів реакції, яке, навпаки, супроводжується виділенням

енергії. Зрозуміло, що з більшою імовірністю самочинно процес буде перебігати у тому випадку, коли витрата енергії на руйнування зв'язків компенсується виграшем енергії при їх утворенні. Іншими словами, якщо енергії виділяється більше, ніж витрачається, тобто $\Delta H_{x.p.} < 0$.

І дійсно, безліч хімічних реакцій протікає самочинно з виділенням енергії і зниженням тепловмісту системи (тобто, екзотермічні процеси, $\Delta H < 0$). Виходячи із спостережень, Бертло (1867 р.) сформулював свою гіпотезу, відому нині як ***принцип самочинного перебігу хімічних реакцій***: *самочинно перебігають лише ті процеси, що супроводжуються виділенням теплоти.*

Однак досвід свідчить, що умова $\Delta H < 0$ не може бути вичерпним критерієм, оскільки поряд з самочинними екзотермічними процесами відома достатня кількість і самочинних ендотермічних процеси, для яких $\Delta H > 0$ (наприклад, розчинення NH_4NO_3 і KCl у воді), і навпаки, деякі екзотермічні реакції за стандартних умов не здійснюються, наприклад, синтез амоніаку NH_3 .

При вивченні хімічних процесів надзвичайно важливо оцінити принципову можливість чи неможливість їх перебігу, а також напрямок і межі самочинного протікання реакцій за даних умов.

10. ЕНТРОПІЯ. ТЕРМОДИНАМІЧНА ІМОВІРНІСТЬ. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Перший закон термодинаміки не дозволяє передбачити:

- (1) буде процес позитивним або негативним,
- (2) при якому співвідношенні концентрацій реагентів встановиться стан рівноваги хімічної реакції та
- (3) як температура та тиск впливають на цей стан рівноваги.

Відповідь ці питання дає друге початок термодинаміки, яке, як і перше початок, є постулатом, сформульованим з урахуванням експериментальних даних. Другий початок термодинаміки – це загальний закон природи, дія якого

протягається на різні системи.

Друге початок термодинаміки носить статистичний характер і застосовується лише до систем із великої кількості частинок, тобто до таких, поведінка яких підпорядковується законам статистики.

Другий початок термодинаміки свідчить про якісну відмінність форм енергії. Теплова енергія утворюється в організмі, певною формою пов'язаної енергії, тобто. в процесі життєдіяльності вона не може бути повністю перетворена на інші види.

Згідно з другим законом термодинаміки, кожен реальний процес, що відбувається в термодинамічній системі, може здійснюватися лише в одному напрямку. Протилежний процес, у якому як система, і навколишнє середовище поверталися в їх початковий стану, неможливий.

Другий початок термодинаміки - фізичний принцип, що накладає обмеження на напрямки процесів передачі тепла між тілами.

Очевидно, що крім ентальпійного фактору, існує й інша рушійна сила самочинного перебігу процесів. Виявилось, що такою рушійною силою є здатність частинок (молекул, іонів, атомів) до хаотичного руху, внаслідок якого система набуває *найбільш імовірного стану* і переходить із більш упорядкованого стану у менш упорядкований. Імовірність зворотного переходу в упорядкований стан, практично дорівнює нулю, тому що такий процес потребує затрати енергії ззовні.

Описаний феномен є спрощеною ілюстрацією до загального закону природи, згідно з яким *статистичні системи* (тобто такі, що складаються з величезної кількості частинок) *завжди прагнуть досягти найбільш невпорядкованого стану*.

Для оцінки ступеня невпорядкованості системи введено спеціальну термодинамічну функцію стану системи – *ентропію S*.

Ентропія – це термодинамічна функція, яка є мірою невпорядкованості і характеризує відносну імовірність стану системи.

В ізольованій системі загальна зміна ентропії завжди позитивна, тобто

незворотні термодинамічні процеси протікають у напрямку зростання ентропії ($S_2 > S_1$, $\Delta S > 0$)

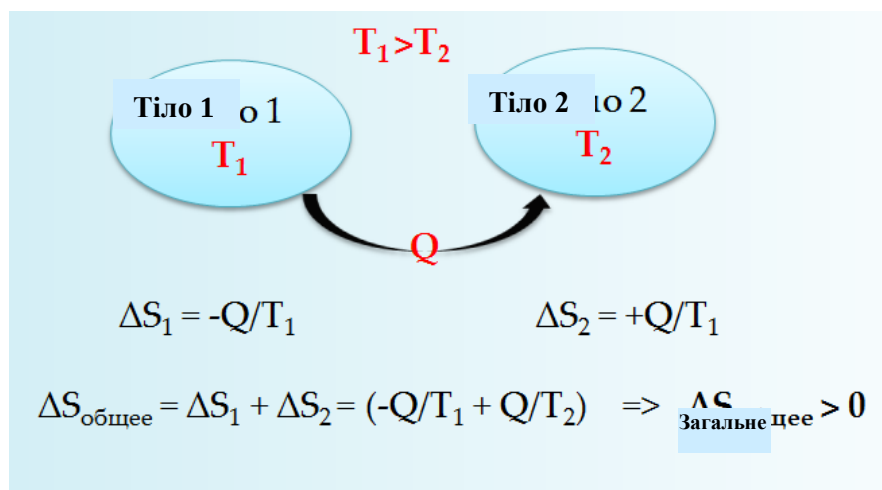


Рис. 12. Передача тепла від одного тіла іншому

Якщо стан ізольованої системи змінюється у напрямку рівноваги, якому притаманні максимальна неупорядкованість частинок тоді цей стан буде характеризуватися найбільшим значенням ентропії, а зміна цього параметра буде дорівнювати нулю. ($\Delta S_{\text{рівноваги}} = 0$).

Реальні біологічні системи відкриті. У відкритій системі загальна зміна ентропії складатиметься з двох складових:

$$dS = \delta Q'/T + \delta Q/T$$

де $\delta Q'/T$ – тепло у самій системі, $\delta Q/T$ – тепло, яким система може обмінюватися із середовищем. Тоді можемо записати цей вираз іншим способом:

$$dS = diS + deS$$

де $diS = \delta Q'/T$ - внутрішній джерело ентропії, $deS = \delta Q/T$ - зовнішнє джерело ентропії.

$$dS/dt = diS/dt + deS/dt$$

Швидкість зміни ентропії в системі дорівнює сумі швидкості продукції ентропії в самій системі та швидкості обміну ентропією між системою та навколишнім середовищем

Швидкість продукції ентропії у системі завжди більше 0, оскільки термодинамічні процеси у ній необоротні.

Таким чином, термодинамічний критерій стаціонарного стану є рівність між продукцією ентропії організмом і потоком негативної ентропії з навколишнього середовища

$$(diS/dt) = -(deS/dt)$$

внаслідок чого повна зміна ентропії в організмі дорівнює нулю: $dS/dt = 0$

Постійність ентропії означає термодинамічна рівновага з довкіллям.

Рівноваги організму з навколишнім середовищем означає біологічну смерть.

Для відкритої системи сталість ентропії встановлює стаціонарний стан системи і характеризує відсутність оборотних процесів, як у разі рівноваги в ізольованому середовищі, а взаємодія з навколишнім середовищем в найбільш оптимальній формі.

Т.ч. 2-й початок термодинаміки для відкритих систем допомагає вказати на доцільність стаціонарного стану системи.

Зміна ентропії відкритої системи может відбуватися у трьох напрямках

$dS/dt > 0$ кількість ентропії в системі зростає

а) $dS/dt > 0$; $diS/dt > 0$; $deS/dt > 0$

б) $dS/dt > 0$; $diS/dt > 0$; $deS/dt = 0$ немає обміну з навколишнім середовищем.

Система ізольована;

в) $dS/dt > 0$; $diS/dt > 0$; $deS/dt < 0$, $deS/dt < diS/dt$

У системі утворюється деяка кількість ентропії, і частина ентропії відтікає в довкілля, але швидкість відтоку невелика і ентропія накопичується у системі

2) $dS/dt = 0$, стаціонарний стан, кількість ентропії постійно

$deS/dt < 0$, $deS/dt = diS/dt$

Вся ентропія, що утворюється у системі, відтікає у навколишнє середовище. Цей стан найбільш характерний для зрілих біологічних систем.

3) $dS/dt < 0$ загальна кількість ентропії в системі зменшується

$$deS/dt < 0, deS/dt > diS/dt$$

Ентропія у цій системі зменшується, але відтікає із системи більше, ніж утворюється, отже, загальна кількість ентропії у системі зменшується.

Розглянемо ще один уявний експеримент. Нехай є ізольована система, розділена перетинкою на дві рівні частини, в одній з яких міститься чотири молекули (рис. 13).

Якщо в деякий момент прибрати перетинку, то завдяки хаотичному руху молекул можуть виникати різні варіанти розподілу частинок по обох частинах посудини. Кожний варіант – це окремий мікростан системи (Рис.13).

Рівномірний розподіл частинок між окремими ділянками об'єму здійснюється лише як середній за часом. У кожний даний момент внаслідок хаотичного руху спостерігається тимчасове збільшення концентрації частинок на одних ділянках об'єму і зменшення її на інших – флуктуації густини. Макроскопічний стан усієї системи в цілому може існувати при різному розподілі частинок (тобто при різних мікроскопічних станах) і буде характеризуватися мікростанами складових частин, які описуються миттєвими координатами частинок та швидкостями різних видів руху в різних напрямках.

Співвідношення кількості частинок у першій та другій половинах посудини	Можливий розподіл частинок по першій та другій половинах посудини	Термодинамічна імовірність W
4:0		$W_1 = 1$
3:1		$W_2 = 4$
2:2		$W_3 = 6$
1:3		$W_4 = 4$
0:4		$W_5 = 1$
$W_T = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = 16$		

Кількість мікростанів, з яких складається даний макроскопічний стан системи, називається **термодинамічна імовірність** W .

Рисунок 13. – Можливі варіанти розподілу чотирьох молекул по двох половинах посудини і термодинамічна імовірність (W) стану системи

Поняття *термодинамічна імовірність* не слід плутати з поняттям *математична імовірність*. Математична імовірність ω – це границя ($\lim$) відношення числа n можливих варіантів очікуваної події до числа дослідів (чи спостережень) N при необмеженому зростанні цього числа ($N \rightarrow \infty$):

$$\omega = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}$$

Математична імовірність майже завжди має дробове значення ($\omega < 1$). І тільки імовірність абсолютно достовірної події може дорівнювати одиниці. А в статистичній фізиці використовується теорема про множення ймовірностей, відповідно до якої *імовірність одночасного перебігу декількох незалежних випадкових подій дорівнює добутку їх імовірностей*, тобто термодинамічна імовірність W_T виражається формулою

$$W_T = \frac{M!}{N_1! N_2! \dots N_n!}$$

Можна підрахувати термодинамічну імовірність для розглянутої моделі (рис. 3.15 і рис. 3.16). Першому і п'ятому розподілу (для яких співвідношення молекул у I і II частинах системи відповідно дорівнюють 4 : 0 і 0 : 4) відповідає термодинамічна імовірність $W_1 = W_5 = 1$. Для другого і четвертого положень (3 : 1 і 1 : 3): $W_2 = W_4 = 4$. Для третього положення (2 : 2) – $W_3 = 6$. Тоді загальний макростан системи описується термодинамічною ймовірністю:

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = 1 + 4 + 6 + 4 + 1 = 16.$$

Зрозуміло, що при розподілі чотирьох молекул газу по двох частинах системи може реалізовуватися ситуація, при якій всі молекули опиняться в одній половині посудини. Зовсім інша справа, якщо система буде складатися не з чотирьох, а припустимо з $N=10^{20}$ молекул – менше одного моля. Для такої кількості молекул імовірність зайняти тільки одну половину посудини

практично дорівнює нулю. Обчислення показують, що для того, щоб всі $N=10^{20}$ молекул одразу зібралися разом в одній половині посудині на період тривалістю всього 0,001 с, необхідно проводити спостереження протягом проміжку часу, що виражається в астрономічних одиницях і дорівнює числу з тридцятьма мільярдами знаків (для довідки: за астрономічну одиницю часу прийнятий період у 10^{13} років). Тобто імовірність такого розподілу фактично дорівнює нулю.

На практиці мають справу з величезним числом частинок у системі, що позначається на великих значеннях термодинамічної імовірності, тому користуються не абсолютною величиною W , а її логарифмом $\ln W$, який пов'язаний з ентропією залежністю:

$$S = k \cdot \ln W,$$

де k – *стала Больцмана* ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), яка, в свою чергу, пов'язана з універсальною молярною сталою R і числом Авогадро N_A ($k = R / N_A$). З урахуванням цього зв'язку для одного моля речовини, рівняння набуває вигляду:

$$S = R \ln W.$$

Таким чином видно, що ентропія, як і молярна стала R ($R = 8,314$ Дж/моль·К), вимірюється у [Дж/моль·К].

*Ентропія речовини у стандартному стані називається **стандартна ентропія** S_{298}^0* .

Таким чином, можна зробити висновок, що термодинамічна ймовірність є числом мікростанів системи, за допомогою яких реалізується цей макростан системи. Чим більше можливо мікростанів (варіантів розташування частинок), тим більше неупорядкована система, тим більше величини W і S .

Кожна система прагне до переходу з менш ймовірного високо упорядкованого стану в статистично більш ймовірні стани, що характеризуються безладним розташуванням молекул. Можна сміливо сказати, кожна система характеризується тенденцією мимовільного початку стану максимального молекулярного безладдя чи хаосу.

11. ВІЛЬНА ЕНЕРГІЯ ГІББСА

Для опису біологічних систем при якому тиск і температура постійні використовується термодинамічний потенціал, що називається вільна енергія Гіббса. Енергію Гіббса можна розуміти як повну хімічну енергію системи

$$G = U + PV - ST$$

де:

U - внутрішня енергія,

P - тиск,

V – об'єм,

T - абсолютна температура,

S - ентропія.

Внутрішні процеси супроводжуються витратою та зменшенням потенціалу Гіббса, який за рахунок обміну з навколишнім середовищем може як збільшуватись, так і зменшуватись. Корисна робота в таких системах виконується за рахунок зменшення потенціалу Гіббса.

***Енергія Гіббса** – це частина енергетичного ефекту хімічної реакції, яку можна перетворити в роботу:*

$$-\Delta G = A_p^{\max}.$$

Знак мінус позначає, що система здатна виконати роботу над навколишнім середовищем тільки за рахунок зменшення енергії Гіббса внаслідок реакції. Оскільки енергію Гіббса можна перетворити в роботу, то її іноді називають ***вільна енергія***.

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S.$$

Другий член правої частини рівняння– ***ентропійний фактор*** – являє собою частину енергетичного ефекту, яку неможливо перетворити у роботу. Ця частина розсіюється у навколишнє середовище у вигляді теплоти, тому ентропійний фактор $T\Delta S$ – це ***зв'язана енергія***.

Енергія Гіббса ΔG є критерій самочинного перебігу хімічної реакції, тому знак перед чисельним значенням ΔG («+» чи «-») дозволяє зробити

висновок про принципову можливість чи неможливість самочинного протікання реакції.

1. Зменшення енергії Гіббса ($\Delta G < 0$) свідчить про те, що самочинний перебіг реакції у прямому напрямку за даних умов є *принципово можливим*
2. Збільшення енергії Гіббса ($\Delta G > 0$) є ознакою *неможливості* самочинного протікання прямої реакції за даних умов.
3. Якщо енергія Гіббса не змінюється ($\Delta G = 0$), то можливе самочинне протікання реакції як у прямому, так і у зворотному напрямках, тобто система перебуває у *стані рівноваги*.

Отже, за виразом $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$ можна зробити наступні висновки:

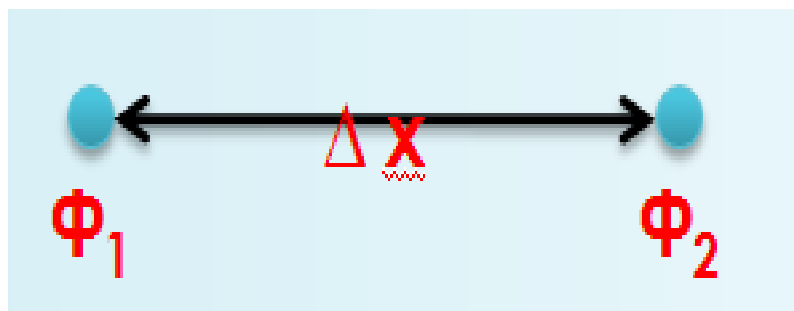
- за низьких температур $\Delta H > T \Delta S$, напрямок реакції визначається ентальпійним фактором: $\Delta G \approx \Delta H$, тобто знаком ΔH .
- за високих температур: $T \Delta S > \Delta H$, тому напрямок визначається ентропійним фактором (прагненням до розриву зв'язків): $\Delta G \approx T \Delta S$.

ΔG обчислюють згідно із законом Гесса, так як і ΔH та ΔS , враховуючи, що ΔG простих речовин дорівнює 0.

12. ПОНЯТТЯ ГРАДІЄНТА

Градiєнт (grad) будь-якого параметра системи є відношенням різниці величин $\Delta \Phi$ цього параметра у двох точках до відстані Δx між ними

$$\text{grad} = \Delta \Phi / \Delta x$$



Біологічна система здатна виконувати роботу, якщо в ній є градієнт. Таким чином, градієнт є своєрідним депо енергії

Зв'язок вільної енергії та градієнта представлений у формулі

$$F = R T \ln \Phi_1/\Phi_2$$

де F - вільна енергія,

R - постійна газова,

Φ - значення термодинамічних параметрів в 1 і 2 точках

У фізико-хімічних системах зміну вільної енергії зазвичай описують через зміну електрохімічного потенціалу μ:

$$\Delta G = m \Delta \mu$$

де:

m - кількість речовини (молі) у системі.

ΔG - зміна вільної енергії Гібса

Зміна електрохімічного потенціалу при переході системи зі стану 1 до стану 2 визначається зміною хімічної, осмотичної та електричної енергії

Величина **вільної енергії Гібса**, що припадає на один іон речовини, називається електрохімічним потенціалом, що включає хімічну, осмотичну та електричну складові енергії:

$$\mu \sim = \mu_0 + RT \ln C + zF\phi$$

де:

μ₀ - стандартний електрохімічний потенціал, що залежить від хімічної природи речовини;

C - концентрація речовини,

R - універсальна газова постійна,

T - термодинамічна температура,

z - електричний заряд частки,

F - константа Фарадея,

φ – електричний потенціал.

13. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ЗАКРІПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ

Для ефективного засвоєння теоретичного матеріалу лекцій передбачено наступні практичні етапи вивчення матеріалу:

1) виконання тестових завдань для виділення основної базової термінології, принципів, законів, що розглядаються в теоретичному матеріалі, необхідного для подальшого застосування в практичній діяльності;

2) розв'язування практичних та ситуативних задач на застосування законів термодинаміки та масопереносу в медицині;

3) вибір студентом індивідуального завдання для більш поглибленого аналізу конкретного приладу або методу в медицині, який базується на вивчених законах термодинаміки та масопереносу.

ТЕМА 1. ОСНОВИ І БАЗОВІ ПРИНЦИПИ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ. ОСОБЛИВОСТІ ЖИВОГО ОРГАНІМУ ЯК ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Система, властивості системи (комунікативність, рівновага, стійкість, адаптація, цілісність, ієрархічність, структуризація, множинність, системність), декомпозиція, структура, функція, ієрархія, емерджентність, синергізм, стан системи.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Система — це: а. множина об'єктів разом з відношеннями між об'єктами та зовнішнім середовищем; б. множина об'єктів разом з відношеннями між об'єктами та між їх властивостями; с. множина функцій, на якій визначене задане відношення з фіксованими властивостями; d. комплекс взаємопов'язаних елементів, що утворюють цілісність;	

	е. утворює особливу єдність з функціями та є елементом «надсистеми»; ф. комплекс елементів, що взаємодіє з зовнішнім середовищем; г. структура та множина функцій, які підпорядковані глобальній меті.	
2	Дайте відповідне визначення наступним властивостям системи: 1. комунікативність, 2. рівновага, 3. стійкість, 4. адаптація. а. здатність системи повертатись до попереднього стану, після того як вона була з нього виведена. б. ступінь зв'язку системи з зовнішнім середовищем. с. здатність системи зберігати деякий стан при відсутності збурень. д. здатність системи до цілеспрямованого пристосування.	
3	Дайте відповідне визначення наступним поняттям: 1. цілісність, 2. ієрархічність, 3. структуризація, 4. множинність, 5. системність. а. наявність множини (принаймні двох) елементів, які розташовані на основі підпорядкування елементів нижчого рівня елементам вищого рівня. б. дозволяє використовувати множину кібернетичних, економічних і математичних моделей для опису окремих елементів і системи в цілому. с. дозволяє розглядати систему одночасно і як єдине ціле, і як підсистему вищестоячих рівнів. д. дозволяє аналізувати елементи системи і їх взаємозв'язки в рамках конкретної організаційної структури. е. властивість об'єкта володіти всіма ознаками системи.	
4	Декомпозиція – це: а. поділ системи на частини з метою зробити зручнішими певні операції з цією системою; б. спрощення системи, надміру складної для розгляду цілком; с. об'єднання елементів в систему шляхом визначення системоутворюючих відношень;	

	d. ускладнення системи, надміру простої для виконання визначених функцій; e. розподіл функцій системи за класами з метою її кращого пізнання; f. все те, що виконує система або може виконувати відповідно до свого призначення; g. це множина частин або форм (елементів), які знаходяться у взаємодії та специфічному порядку.	
5	Функція системи – це: a. спрощення системи, надміру складної для розгляду цілком; b. сукупність станів елементу в просторі та часі; c. об'єднання елементів в систему шляхом визначення системотворчих відношень; d. все те, що виконує система або може виконувати відповідно до свого призначення; e. стійка упорядкованість у просторі і в часі елементів і зв'язків системи.	
6	Структура – це: a. це стійка упорядкованість у просторі і в часі елементів та зв'язків між системою та зовнішнім середовищем; b. множина обмежень на потоки в просторі та часі; c. сукупність всіх об'єктів, зміна яких впливає на систему, а також об'єктів, що змінюються під дією системи; d. те, що може чи повинно виникнути, прообраз майбутнього, стан, який бажано досягнути; e. сукупність станів елементу в просторі та часі; f. множина частин або форм (елементів), які знаходяться у взаємодії та специфічному порядку, необхідному для реалізації функцій;	
7	Ієрархія – це: a. структура з підпорядкованістю, тобто з нерівноправними зв'язками — дії в одному напрямку виявляють набагато більший вплив, аніж в оберненому; b. деревовидна структура, в якій відношення підпорядкування служать для забезпечення інформованості верхніх рівнів ієрархії; c. мережа, в якій завдяки наявності великої кількості зв'язків між елементами забезпечується стійкість системи; d. система, в якій діють негативні зворотні зв'язки, що сприяють досягненню системою глобальної мети; e. структура з жорстким підпорядкуванням та централізацією і наявністю асиметричних зв'язків,	

	внаслідок чого завжди забезпечується досягнення генеральної мети.	
8	Стан системи – це: a. значення характеристик системи, важливі для цілей дослідження; b. зафіксовані значення характеристик системи, важливі для цілей дослідження; c. нефіксовані значення характеристик системи; d. показники, без яких неможливе нормальне функціонування системи.	
9	Емерджентність – це така властивість складної системи, яка: a. дозволяє розглядати деякий об'єкт в якості системи без безвідносно до конкретних властивостей та відношень; b. відображає той факт, що стан системи — це функція як станів н елементів, так і відношень (зв'язків) між ними; c. стверджує, що система поводить себе як одне ціле, якщо зміни однієї зі змінних викликають зміни інших змінних; d. полягає в тому, що у складній системі наявні властивості, що не можуть бути виведені з відомих властивостей елементів, які входять до її складу; e. стверджує, що при незмінних способах дії елементів спосіб дії системи не змінюється, якщо змінюється структура системи; f. дозволяє розглядати систему як підсистему системи вищого рівня; g. дозволяє розглядати підсистему як систему зі своїм складом елементів та зв'язків між ними.	
10	Синергізм полягає в тому, що: a. в деяких системах кожна зі змінних може розглядатися незалежно від інших, і відхилення системи загалом є фізичною сумою відхилень її окремих елементів; b. відкриті системи розвиваються в напрямку диференціації та спеціалізації; c. з часом одна зі складових системи може стати домінуючою, тобто зміни в цій складовій спричиняють зміни в багатьох інших; d. ефективність сумісного функціонування елементів системи вища, ніж сумарна ефективність ізольованого функціонування цих же елементів; e. вхідні інформаційні потоки в системі використовуються для корегування відхилень шляхом негативного оберненого зв'язку або керування за збуреннями.	

Література для підготовки:

1. Кустовська О. В. Методологія системного підходу та наукових досліджень: Курс лекцій. – Тернопіль: Економічна думка, 2005. – 124 с.
2. Теорія інформації та її біологічні аспекти: навч. посіб. / Прилуцький Ю.І., Богущька К.І., Ноздренко Д.М. – К.: ПЦ «Інтертехнодрук», 2006. – 92 с.

ТЕМА 2. ВІДКРИТІ БІОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ, ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ І ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ. ПРОЦЕСИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В БІОСИСТЕМАХ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Диференціальне рівняння теплопровідності, складові; характеристики теплового балансу, складові; теплопровідність, конвекція, випромінювання; принцип методики контактної та перфузійної гіпотермії; для теплопровідності: перший закон термодинаміки; закон Кірхгофа; закон Ньютона; другий закон термодинаміки; закон Фур'є; температурне поле, ізотермічні поверхні, ізотерми, тепловий потік, градієнт температури.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Частина внутрішньої енергії системи, яку не можна використати для здійснення роботи називається: а. вільною; б. зв'язаною; с. потенційною	
2	Біологічна система є: а. відкритою і рівноважною; б. відкритою і стаціонарною; с. закритою і рівноважною; д. закритою і нерівноважною; е. ізольованою і рівноважною; ф. ізольованою і нерівноважною.	
3	Система знаходиться в стаціонарному стані. При цьому: а. термодинамічні параметри постійні у часі і однакові у всіх частинах системи, система є відкритою або закритою; б. термодинамічні параметри не змінюються у часі, але	

	можуть відрізнятися в різних частинах системи, система ізольована; с. система не змінюється у часі, в ній підтримуються постійними градієнти параметрів, система є відкритою або закритою; d. термодинамічні параметри є постійними у часі і однаковими у всіх частинах системи, система є ізольованою; е. термодинамічні параметри змінюються за часом, система є відкритою.	
4	Відповідно до теореми Пригожина, в стаціонарному стані при фіксованих зовнішніх параметрах продукція ентропії відкритої системи: a. безмежно зростає; b. приймає постійне в часі мінімальне позитивне значення; с. безмежно спадає; d. приймає від'ємне значення; е. дорівнює нулю.	
5	Дисипативна функція β визначає: a. швидкість зростання ентропії у системі, в якій протікають необоротні процеси; b. швидкість зменшення ентропії у системі, в якій протікають необоротні процеси; с. стан системи; d. швидкість зростання ентропії у системі, в якій протікають оборотні процеси.	
6	Постійність ентропії означає, що зміна стану a. безповоротно, b. оборотно.	
7	При зменшенні ентропії впорядкованість системи a. підвищується b. знижується	
8	З пониженням температури міра безладу a. збільшується b. зменшується	
9	В рівнянні $Q = \Delta U + A$ прийнято вважати $A > 0$: a. Якщо робота здійснюється над системою; b. Якщо роботу здійснює сама система.	
10	Параметр, що характеризує середню кінетичну енергію теплового руху молекул: a. температура; b. абсолютна температура; с. ентальпія; d. ентропія	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач з визначення: температурних діапазонів для м'якої, помірної і глибокої гіпотермії; теплопровідності, конвекції, випромінювання, випаровування з поверхні біосистеми; теплоутворення та теплообміну в організмі людини, температурного поля та температурного градієнту.

Задача № 1	
	Визначити дисипативну функцію β необоротного процесу всередині системи, якщо за 10 секунд ентропія зросла на 10 кДж/ К і система підтримується при температурі 37°C. Відповідь: 310 кВт Приклад розв'язування: Дисипативна функція β характеризує швидкість зростання ентропії в системі, в якій відбуваються необоротні процеси: $\beta = T \frac{dS}{dt} = (273 + 37) \frac{10}{10} = 310 \text{ кВт}.$
Задача № 2	
	Визначити загальну зміну ентропії у відкритій системі, якщо відомо, що в результаті необоротних процесів усередині неї виділилося 1240 кДж теплоти, 25 % якої передалося у навколишнє середовище. Температура системи підтримується при температурі 37 °C. Відповідь: 5 кДж/К
Задача № 3	
	Визначити зміну ентропії при плавленні 300 г льоду. Питома теплота плавлення льоду становить 335 кДж/кг. Відповідь: 368 Дж/К
Задача № 4	
	Розрахувати зміну ентропії при нагріві 100 г води від 0 до 15°C . Середня питома теплоємність в цьому діапазоні температур дорівнює $4,193 \cdot 10^3 \text{ Дж / кг} \cdot \text{K}$. Відповідь: 22,4 Дж/К
Задача № 5	
	Визначити теплоту, необхідну для нагріву 1,0 моль/хв абсолютно сухого

	повітря, що надходить до легень. Теплоємність повітря дорівнює 30 Дж/моль·град. Вважати, що повітря миттєво нагрівається від температури довкілля 25 °С до температури тіла 37 °С. Відповідь: 6 Вт
Задача № 6	
	Визначити, скільки теплоти втрачає кров при її штучному охолодженні на 5°С за наступних умов: хвилинний обсяг кровообігу 5 л/хв, густина і теплоємність цільної крові відповідно дорівнюють 1,056 г/см³ і 3,74 Дж/г·°С. Відповідь: 1646 Вт

Література для підготовки:

1. Біофізика. Фізичні методи аналізу та метрологія: підручн. / Е.І. Личковський, В.О. Тіманюк, О.В. Чалий, Ю.Є. Лях, О.М. Животова. – Вінниця: Нова Книга, 2014. – 464 с.
2. Григор'єва Л.І., Томілін Ю.А. Основи біофізики і біомеханіки: навч. посіб. – Миколаїв: Вид-во Чорноморського державного університету ім. П. Могили, 2011. – 300 с.

ТЕМА 3. ОСНОВНІ ВИДИ ТА ЗАКОНИ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛА В БІОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ. ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ І ТЕМПЕРАТУРНИЙ ГРАДІЄНТ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Енергія системи: вільна, зв'язана, потенційна; характеристика понять: температура; абсолютна температура; ентальпія; ентропія; система: відкрита, рівноважна, стаціонарна, замкнута, нерівноважна, ізольована; теорема Пригожина і її випадки; критерії досягнення стійкості стану біологічної системи; дисипативна функція; безповоротність, оборотність процесу, впорядкованість, невпорядкованість; визначення та формули першого і другого законів термодинаміки; інтенсивні та

екстенсивні термодинамічні параметри: сила; тиск; температура; хімічний потенціал; електричний потенціал; об'єм; заряд; маса; число молей речовини, що вступають в реакцію; I закон термодинаміки для ідеального газу: при ізохоричному процесі, при ізобаричному процесі, при ізотермічному процесі, при адіабатичному процесі; вільна енергія хімічної реакції; зміна стандартної вільної енергії.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Який термодинамічний принцип лежить в основі методики контактної (1) та перфузійної (2) гіпотермії: а) конвекція; б) тепломасообмін; с) теплопровідність.	
2	Диференціальним рівнянням теплопровідності називається виражений в математичній формі перший закон термодинаміки (розшифрувати буквені позначення): $dQ + dQ_s = dU + dA$, де dQ –; dQ_s –; dU –; dA –	
3	Складові характеристики теплового балансу при терморегуляції організму: а) конвекція, теплопровідність, тепломасообмін; б) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання; с) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання, тепломасообмін; д) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання, біомасоперенос.	
4	Назвіть складові, що входять у тепловий баланс елементу тканини: а) кількість теплоти, що виділяється в результаті обмінних метаболічних процесів; б) тепловий потік в результаті теплопровідності; с) конвективне перенесення теплоти кров'ю; д) конвективний тепловий потік між поверхнею тіла і середовищем; е) радіаційний тепловий потік випромінюванням; ф) тепловий потік при випаровуванні поту з поверхні	

	шкіри; g) тепловий потік з дихальних шляхів.	
5	Конвекція (1), масообмін (2), теплопровідність (3), теплове випромінювання (4) – це: a) перенесення тепла внаслідок безладного теплового руху мікрочастинок, що безпосередньо стикаються одна з одною (рух молекул в газах і крапельних рідинах, коливання атомів у кристалічній решітці твердих тіл, дифузія вільних електронів в металах). b) перенесення тепла внаслідок руху та перемішування макроскопічних об'ємів газу/рідини з відкритих поверхонь в оточуюче середовище, обумовлене різницею щільності в різних точках об'єму рідини/газу, що виникає внаслідок різниці температур. c) процес поширення електромагнітних коливань з різною довжиною хвиль, обумовлене тепловим рухом атомів або молекул випромінюючого тіла. d) мимовільний і незворотний процес перенесення частини речовини в просторі з неоднорідним полем хімічного потенціалу в напрямку зменшення цього хімічного потенціалу.	
6	1. Енергію через вакуум можна передати ... 2. Енергія передається через шар нерухомої речовини ... 3. Енергія переходить від більш нагрітого тіла до менш нагрітого тіла ... 4. Енергія переноситься струменями або потоками речовини a) при теплообміні випромінюванням. b) при теплообміні конвекцією. c) при теплообміні теплопровідністю. d) при будь-якому способі теплообміну.	
7	1. Перший закон термодинаміки стверджує, що ... 2. Закон Кірхгофа пророкує, що ... 3. В закономірності Ньютона помічено, що ... 4. Другий закон термодинаміки говорить, що ... a) потужність теплообміну між тілами залежить від різниці їх температур. b) теплообмін відбувається тільки між нагрітими тілами. c) внутрішню енергію тіла можна змінити роботою або теплопередачею. d) тіла, добре випромінюючі енергію, будуть і добре її поглинати. e) теплота не може самостійно переходити від холодного тіла	

	до гарячого.	
8	Температурне поле - це: а) кількість теплоти, передана в одиницю часу через одиницю поверхні; б) геометричне місце точок, які мають в даний момент часу однакову температуру; в) сукупність значень температур у всіх точках розглянутого тіла в даний момент часу; г) теплова енергія, що передається від одного тіла до іншого протягом якогось часу.	
9	Ізотермічні поверхні: а) не перетинаються; б) перетинаються; в) збігаються одна з іншою; г) замикаються на себе.	
10	Тепловий потік, проходить через тришарову плоску стінку, буде: а) більше в чотири рази для 1-го шару, ніж для третього шару; б) більше в два рази для 2-го шару, ніж для третього шару; в) менше в три рази для 1-го шару, ніж для третього шару; г) менше в два рази для 2-го шару, ніж для третього шару; д) однаковий для 1-го, 2-го і 3-го шарів.	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач з визначення: ентропії, стандартної вільної енергії хімічної реакції, дисипативної функції, законів перетворення та збереження енергії в біологічній системі.

Задача № 1	
	Визначити питомий тепловий потік через мембрану плоского діалізатора крові при наступних умовах: товщина мембрани $\delta = 1$ мм, коефіцієнт теплопровідності мембрани $\lambda = 0,2$ Вт/(м•К), температура крові $T_{кр} = 37^\circ\text{C}$, а діалізату $T_d = 24^\circ\text{C}$. Процес вважати стаціонарним. Відповідь: $q = 2600 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ Приклад розв'язування: Відповідно до закону Фур'є: $q = -\lambda \frac{dT}{dx}; \rightarrow dT = -\frac{q}{\lambda} dx \rightarrow T = -\frac{q}{\lambda} x + C.$

	По товщині мембрани температура змінюється за прямолінійним законом. При $x = 0$, $T = T_{KP} = C$, при $x = \delta$, $T = T_D$. Підставивши ці значення матимемо: $T_D = -\frac{q}{\lambda} \delta + T_{KP}$ Питомий тепловий потік через мембрану : $q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{KP} - T_D) = \frac{0,2}{10^{-3}} (37 - 24) = 2600 \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$
Задача № 2	
	Визначити корисну потужність м'язу, якщо при його скороченні впродовж 0,3 с виділяється 5,4 кДж теплоти з коефіцієнтом корисної дії 25%. Відповідь: 6 кВт
Задача № 3	
	Який максимальний вантаж може підняти м'яз на висоту 1 м за рахунок енергії 1 кДж при коефіцієнті корисної дії 30%. Відповідь: $m = 30,6 кг$
Задача № 4	
	Визначити теплопродукцію м'язу, якщо м'яз здатний підняти вантаж масою 100 г на висоту 30 см з коефіцієнтом корисної дії 20%. Відповідь: 1,2 Дж
Задача № 5	
	Яка була б температура м'язу, якби він працював як теплова машина з коефіцієнтом корисної дії $\eta = 40\%$ при температурі довкілля $20^\circ C$. Відповідь: $215^\circ C$
Задача № 6	
	Визначити кількість тепла, що втрачається людиною за одиницю часу з одиниці поверхні тіла за рахунок зовнішньої конвекції, за наступних умов: середня температура поверхні тіла $33^\circ C$; температура довкілля $20^\circ C$; коефіцієнт тепловіддачі $50 Вт/м^2 \cdot град$. Відповідь: $650 Вт/м^2$
Задача № 7	
	Визначити, на скільки процентів збільшується енергетична світимість тіла людини при підвищенні температури з $36^\circ C$ до $39^\circ C$? Відповідь: 3,94%

Задача № 8	
	Визначити, на скільки процентів збільшується енергетична світимість тіла людини при підвищенні температури з 37°C до 38 °C? Відповідь: 1,3%
Задача № 9	
	Оцінити, на скільки градусів, при відсутності терморегуляції, підвищилася б температура тіла масою 60 кг при вжитку 600 мл води з температурою 54 °C. Середня температура тіла 34 °C. Питомі теплоємності води і тіла вважати однаковими. Відповідь: 0,2 град
Задача № 10	
	Скільки енергії втрачається за одну годину стояння босоніж на льоду за наступних умов: температура поверхні льоду 0°C, температура стоп 34 °C, площа контакту кожної стопи з льодом 0,02 м², товщина шкіри 5 мм, коефіцієнт теплопровідності шкіри 0,3 Вт/м•град. Відповідь: 293,76 кДж/год
Задача № 11	
	Визначити питомий тепловий потік через мембрану плоского діалізатора крові при наступних умовах: товщина мембрани $\delta = 0,8$ мм, коефіцієнт теплопровідності мембрани $\lambda = 0,4$ Вт/(м•К), температура крові $T_{кр} = 37^\circ\text{C}$, а діалізату $T_d = 24^\circ\text{C}$. Процес вважати стаціонарним. Відповідь: $q = 6500 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$
Задача № 12	
	Питомий тепловий потік через мембрану завтовшки $\delta = 1$ мм складає $q = 2600 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Визначити різницю температур між поверхнями мембрани, якщо вона виготовлена з полікарбонату з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,2 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{град}$. Процес вважати стаціонарним. Відповідь: $\Delta T = 13 \text{ град}$
Задача № 13	
	Визначити вектор градієнта температури в точці з координатами $x = 1, y = 3, z = 0,5$, якщо розподіл температури в тілі задано рівнянням: $T = T(x, y, z) = 3xy + z^2$. Відповідь: $\text{grad } T_A = 9i + 3j + k$
Задача № 14	
	Знайти повний термічний опір штучної шкіри, що складається з 3 шарів

	плівок. Коефіцієнт теплопровідності і товщина плівки першого типу дорівнюють λ_1 та δ_1. Відповідні величини для плівки другого і третього типу становлять λ_2, δ_2 і λ_3, δ_3. Відповідь: Повний термічний опір штучної шкіри становить $\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$
Задача № 15	
	Знайти повний термічний опір штучної шкіри, що складається з 2 шарів плівок. Коефіцієнт теплопровідності і товщина плівки першого типу дорівнюють λ_1 та δ_1. Відповідні величини для плівки другого типу становлять λ_2, δ_2. Відповідь: Повний термічний опір штучної шкіри становить $\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)$
Задача № 16	
	Визначити різницю температур між внутрішньою і зовнішньою поверхнями матеріалу завтовшки 5 мм при щільності теплового потоку 90 Вт/м² та коефіцієнті теплопровідності матеріалу 0,15 Вт/м·град. Відповідь: 3 град.
Задача № 17	
	Визначити градієнт температури у стінці матеріалу завтовшки 5 мм при щільності теплового потоку 90 Вт/м² та коефіцієнті теплопровідності матеріалу 0,15 Вт/м·град. Відповідь: 600 град/м.

Література для підготовки:

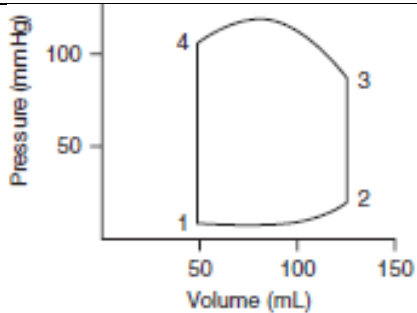
1. Лопушанський Я.Й. Збірник задач і запитань з медичної і біологічної фізики: навч. посіб. – Вінниця: Нова Книга, 2010. – 584 с.
2. Огурцов А.Н., Близнюк О.Н. Фізико-хімічні основи біотехнології. Біотермодинаміка: Навч. посіб. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – 256 с.
3. Костюк П.Г., Зима В.Л., Магура І.С., Мірошніченко М.С., Шуба М.Ф. Біофізика: підруч. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2008. – 567 с.

ТЕМА 4. РОБОТА СЕРЦЯ. РЕЄСТРАЦІЯ І ПІДТРИМКА РОБОТИ СЕРЦЯ. БІОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СЕРЦЯ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Механізм Франка-Старлінга; зв'язок механічного (систола, діастола, синхронність роботи, фази серцевого циклу) і електричного (провідна система серця) скорочення серця; параметри роботи серця (ударний об'єм (УО), хвилинний об'єм крові (ХОК), кінцево-діастолічний об'єм (КДО), кінцево-систолічний об'єм (КСО), фракція викиду (ФВ), серцевий викид (СВ)); об'єми і тиски роботи серця (схема); закони і формули зв'язку лінійної і об'ємної швидкості крові в судинах, закон і формула Пуазейля, розрахунок периферичного опору судинної системи.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Механізм Франка-Старлінга: а) чим більший кінцево-діастолічний об'єм шлуночка (переднавантаження), тим більша величина ударного об'єму. б) чим більше м'язи серця розтягнуті під впливом крові, що надходить в кінці діастолі, тим більша сила скорочення шлуночка під час наступної систоли.	
2	Праве та ліве серце працюють: а) абсолютно синхронно, забезпечуючи однаковий кровотік в обох колах кровообігу. б) ліве серце працює активніше, ніж праве. Кровотік в великому колі кровообігу більший.	
3	Як зміняться тиски крові в шлуночку та аорті при аортальному стенозі: а) в нормі тиски крові на стінки в аорті та шлуночку однакові. При аортальному стенозі тиск в аорті буде меншим, ніж тиск в шлуночку. б) в нормі тиск крові на стінки в аорті більший, ніж у шлуночку. При стенозі тиск в аорті ще більше зросте.	
4	На кривій тиск-об'єм точки 1, 2, 3, 4 відображають: а) закриття аортального клапана; б) відкриття мітрального клапана; в) закриття мітрального клапана; г) відкриття аортального клапана; д) початок шлуночкової систоли.	

		
5	Серцевий викид – це: а) кількість крові, що викидається правим і лівим шлуночком за хвилину. б) кількість крові, що викидається лівим шлуночком за одне скорочення серця.	
6	Як зміниться лінійна швидкість руху крові по судині, при частковому перекритті її третини бляшкою: а) не зміниться. б) збільшиться втричі. в) зменшиться втричі.	
7	Припустимо, що довжина і діаметр однієї кровоносної судини стали меншими вдвічі (розписати задачу на окремому листку з формулами і вкласти фото). 7.1) Визначити як зміниться опір судини. 7.2) Як зміниться падіння тиску на ньому, якщо кровотік в ньому лишиться незмінним. 7.3) Як зміниться кровотік в цій судині, якщо незмінним лишиться падіння тиску на ньому.	
8	Вирахуйте загальний периферичний опір великого і малого кіл кровообігу для людини, для якої у стані спокою хвилинний об'єм кровообігу рівний 5 л/хв., системний артеріальний тиск 120/80 мм.рт. ст., а тиск в легеновому колі кровообігу рівний 25/8 мм.рт.ст. (розписати задачу на окремому листку з формулами і вкласти фото)	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач з визначення: руху крові у замкнутому кровоносному руслі, розподілу об'єму крові, швидкості та кров'яного тиску по різних відділах судинної системи; зміни гемодинамічних показників при звуженні просвіту судин і зміні в'язкості крові; метаболічної та механічної роботи серця, енергетики скорочення кардіоміоцитів, потужності серцевого м'яза, ККД серця, залежності ККД від величини навантаження на міокард, кисневого балансу,

ударного об'єму; застосування закону Франка-Старлінга, фазовий аналіз серцевого циклу.

Задача № 1

Визначити хвилинний об'єм крові за наступних умов: концентрація кисню в артеріальній крові 200 мл/л, концентрація кисню у венозній крові 150 мл/л, загальний вжиток кисню в організмі 600 мл/хв.

Відповідь: 12 л/хв.

Приклад розв'язування:

Згідно з методом Фіка хвилинний об'єм крові V дорівнює:

$$V = \frac{M / t}{c_A - c_B},$$

де M / t - загальний вжиток кисню за одиницю часу;

c_A - концентрація кисню в артеріальній крові;

c_B - концентрація кисню у венозній крові.

$$V = \frac{600 \left[\frac{\text{мл}}{\text{хв}} \right]}{(200 - 150) \left[\frac{\text{мл}}{\text{л}} \right]} = 12 \left[\frac{\text{л}}{\text{хв}} \right]$$

Задача № 2

Визначити ударний об'єм лівого шлуночку, якщо хвилинний об'єм кровообігу становить 4800 мл/хв, а частота серцевих скорочень 1,6 Гц.

Відповідь: 50 мл

Задача № 3

Визначити максимальний об'єм лівого шлуночку, якщо відомо, що хвилинний об'єм кровообігу 5000 мл/хв, частота серцевих скорочень 1 Гц, а фракція викиду 65%.

Відповідь: 128 мл

Задача № 4

Атріовентрикулярні клапани відкриті:

а) під час систоли передсердь;

б) під час систоли шлуночків;

в) під час як систоли передсердь, так і діастоли шлуночків;

г) під час як систоли передсердь, так і першої половини діастоли шлуночків;

д) коли об'ємна швидкість крові через порожнисту вену більше об'ємної швидкості крові через аорту.

	Відповідь: г) під час як систоли передсердь, так і першої половини діастоли шлуночків
Задача № 5	
	Для пацієнта з кінцево-діастолічним об'ємом лівого шлуночка 100 мл і ударним об'ємом лівого шлуночка 50 мл фракція вигнання становить: Відповідь: 50 %
Задача № 6	
	Визначити хвилинний об'єм кровообігу пацієнта з частотою серцевих скорочень 60 ударів за хвилину та кінцево-діастолічним і кінцево-систолічним об'ємами лівого шлуночка 100 і 50 мл відповідно. Відповідь: 3 л/хв.
Задача № 11	
	Визначити максимальний об'єм лівого шлуночка, якщо відомо, що хвилинний об'єм кровообігу $Q = 5760$ мл/хв, частота серцевих скорочень $f = 1,2$ Гц, а фракція вигнання $F = 65\%$. Відповідь: 123 мл
Задача № 12	
	Визначити роботу, що здійснюється лівим шлуночком серця за одне скорочення, вважаючи, що робота складається з подолання існуючого в аорті тиску, що дорівнює 100 мм рт. ст. та надання ударному об'єму крові необхідної швидкості. Ударний об'єм крові 80 мл, густина крові 1056 кг/м^3 , швидкість крові в аорті 0,5 м/с. Відповідь: 1,08 Дж.
Задача № 13	
	Оцінити метаболічну енергію, що витрачається лівим шлуночком за добу, вважаючи, що протягом усіх 24 годин лівий шлуночок працює стабільно з потужністю 1,08 Вт, а ефективність трансформації метаболічної енергії в механічну роботу складає 20%. Відповідь: 466560 Дж за добу

Література для підготовки:

1. Герман И. Фізика організму людини. – Довгопрудний: Видавничий Дім «Інтелект», 2011. – 992 с.
2. Фізіологія: навч. посіб. / О.А. Кашенко, О.М. Поспелов, С.Л. Ляшенко, Г.О. Волохова; за ред. проф. О.А. Шандри. – Одеса : ОНМедУ, 2013. – 288 с.

3. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. Молекулярна фізика: навч. посіб. – К.: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2007. – 462 с.

4. Артюхов В.Г., Ковалева Т.А., Наквасина М.А., Башарина О.В., Путинцева О.В., Шмелев В.П. Біофізика: підручник. – М.: Академ., 2009. – 294 с.

ТЕМА 5. ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПАРАМЕТРИ ПРОВЕДЕННЯ ШТУЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЛЕГЕНЬ ТА ІНТУБАЦІЙНОГО НАРКОЗУ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Газообмін; поняття: дифузія, осмос, активний транспорт; механіка вдиху і видиху: зміни об'єму грудної клітки, тиск в плевральній порожнині, об'єм легень, тиск в альвеолах; резервний об'єм вдиху і видиху; ємність вдиху; функціональна залишкова ємність легень; залишковий об'єм легень; загальна ємність легень; дихальний об'єм; парціальний тиск газу; з'єднання гемоглобіну в капілярах альвеол; крива дисоціації оксигемоглобіну.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Газообмін в легенях і тканинах відбувається шляхом: а) дифузії б) осмосу в) активного транспорту.	
2	При вдосі відбувається: а) збільшення об'єму грудної клітки і негативний тиск в плевральній порожнині б) зменшення об'єму грудної клітки і підвищений тиск в плевральній порожнині в) зменшення об'єму грудної клітки і негативний тиск в плевральній порожнині.	
3	При видиху: а) об'єм грудної клітки зменшується і об'єм легень зменшується, тиск в альвеолах зростає. б) об'єм грудної клітки збільшується і об'єм легень зменшується, тиск в альвеолах зростає.	

	с) об'єм грудної клітки зменшується і об'єм легень зменшується, тиск в альвеолах падає.	
4	Резервний об'єм вдиху (1), ємність вдиху (2): а) максимальний об'єм газу, який можна додатково вдихнути після спокійного вдиху. б) максимальний об'єм газу, який можна вдихнути після спокійного видиху.	
5	Резервний об'єм видиху (1), функціональна залишкова ємність легень (2): а) максимальний об'єм газу, який можна додатково видихнути після спокійного видиху. б) об'єм газу, що залишається в легенях після спокійного видиху.	
6	Залишковий об'єм легень (1), загальна ємність легень (2), дихальний об'єм (3): а) об'єм газу, що залишається в легенях після максимального видиху. б) загальна кількість газу, що утримується в легенях після максимального вдиху. с) об'єм газу, що вдихається і видихається при спокійному диханні.	
7	Що називається парціальним тиском газу? а) тиск, що припадає на одну частку цього газу в газовій суміші б) величина тиску в альвеолах с) сила, з якою молекули розчиненого газу прагнуть вийти в газове середовище.	
8	Яка сила забезпечує перехід газів через стінку альвеол? а) різниця парціального тиску б) різниця негативного тиску в плевральній порожнині при вдосі і видосі с) скорочення дихальних м'язів.	
9	Яке з'єднання гемоглобіну в основному міститься в капілярах альвеол? а) метгемоглобін б) оксигемоглобін с) дезоксигемоглобін.	
10	Кривою дисоціації оксигемоглобіну називається: а) залежність кількості оксигемоглобіну від парціального тиску кисню в крові б) залежність кількості кисню, поглиненого тканинами з артеріальної крові с) залежність кількості кисню, що може зв'язати кров при повному насиченні гемоглобіну киснем.	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач з визначення: механіки вдиху і видиху, парціального тиску, об'єму і процентного складу основних газів повітря (N_2 , O_2 , CO_2 , і H_2O) в кожній камері трьохкамерної моделі легень для одного повного дихального циклу.

Задача № 1	
	Визначити об'єм азоту, що вдихається за 1 дихальний цикл при дихальному об'ємі пацієнта $DO=600$ мл. При нормальних умовах ($23^\circ C$, 760 ммНг) парціальний тиск азоту N_2 у повітрі становить 597 ммНг. Відповідь: $471,3$ мл Приклад розв'язування: Вміст азоту, що вдихається: $C_{N_2} = \frac{p_{N_2}}{760} 100 = \frac{597}{760} 100 = 78,55\%.$ Об'єм азоту, що вдихається за 1 дихальний цикл: $V_{N_2} = \frac{C_{N_2}}{100} \cdot DO = \frac{78,55}{100} \cdot 600 = 471,3 (\text{мл})$
Задача № 2	
	При проходженні крові через капіляри зміст оксигемоглобіну HbO_2 знизився з 96% до 80%. Скільки кисню переходить у тканини при кисневій місткості крові 20% (20 мл на 100 мл крові). Відповідь: $3,2$ мл O_2/ 100 мл крові
Задача № 3	
	Визначити парціальний тиск кисню в альвеолярній газовій суміші, якщо при атмосферному тиску 760 мм.рт.ст., його вміст в газовій суміші становить $14,5\%$. Парціальний тиск водяної пари в альвеолярній газовій суміші при нормальній температурі дорівнює 47 мм.рт.ст. Відповідь: $103,4$ мм.рт.ст.
Задача № 4	
	Визначити дихальний коефіцієнт для особи, яка вдихає повітря, що містить $20,96\%$ кисню та $0,03\%$ двоокису вуглецю, а видихає – 17% кисню та $3,5\%$ двоокису вуглецю. Відповідь: $DK=0,876$.
Задача № 5	
	Визначити швидкість споживання організмом кисню при хвилинному

	об'ємі дихання 100 л/хв, якщо вміст кисню у повітрі при вдиху 21%, а при видиху 16%.
	Відповідь: 5 л/хв
Задача № 6	
	Визначити об'єм кисню, що вдихається за 1 дихальний цикл при дихальному об'ємі пацієнта $DO=500$ мл, якщо парціальний тиск кисню при нормальних умовах (23°C , 760 мм Hg), становить 159 ммHg.
	Відповідь: 104,6 мл

Література для підготовки:

1. Герман И. Фізика організму людини. – Довгопрудний: Видавничий Дім «Інтелект», 2011. – 992 с.
2. Фізіологія: навч. посіб. / О.А. Кащенко, О.М. Поспелов, С.Л. Ляшенко, Г.О. Волохова; за ред. проф. О.А. Шандри. – Одеса : ОНМедУ, 2013. – 288 с.

ТЕМА 6. ФІЗІОЛОГІЯ НИРОК. ФІЗІОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ГЕМОДІАЛІЗУ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Ультрафільтрація, дифузія, конвекція, інфузія; кліренс, осмос; принципи та параметри гемодіалізу; тиск крові, тиск діалізата, трансмембранний тиск, граничний трансмембранний тиск, різниця концентрацій, швидкість перфузії крові, обсяг кровозаповнення, коефіцієнт ультрафільтрації, кліренси, тестові речовини для кліренсу, нульовий тиск в практиці гемодіалізу, адекватність процесу гемодіалізу, параметри. Які параметри входять в моніторинг екстракорпоральної циркуляції на панелі монітора? Які параметри є елементами моніторингу діалізата?

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	Який фізичний процес лежить в основі очищення крові під час гемодіалізу? а) Ультрафільтрація. б) Дифузія.	

	в) Конвекція. Інфузія	
2	Як називається процес видалення рідини з крові в діалізаторі? а) Кліренс. б) Осмос. Ультрафільтрація.	
3	Який фактор обумовлює задану швидкість видалення надлишкової рідини? а) Тиск крові. б) Тиск діалізата. в) Тиск крові і діалізата - трансмембранне тиск. г) Всі відповіді вірні Правильних відповідей немає	
4	Який тиск є граничним для звичайної гемодіалітичної мембрани? а) 1 атм. б) 2 атм. в) 500 мм рт. ст. г) 500 Па. д) 1000 мм рт. ст.	
5	Що є основною рушійною силою переходу молекул через гемодіалітичну мембрану? а) Різниця концентрацій. б) Трансмембранне тиск. в) Швидкість перфузії крові. г) Обсяг кровозаповнення. д) Тиск діалізата	
6	Які параметри гемодіалізатор визначають його очищувальну здатність? а) Коефіцієнт ультрафільтрації. б) Кліренс. в) Обсяг кровозаповнення. г) Тиск діалізата	
7	За якими тестовими речовинами визначають кліренс гемодіалізатора? а) Натрій, кальцій. б) Сечовина, креатенін, фосфат. в) Білірубін, калій. г) Вітамін В6, В12.	
8	Що таке нульовий тиск в практиці гемодіалізу? а) 0 мм рт.ст. б) -2 Атм. в) -1 Атм.	

	г) 760 мм рт. ст. д) 833 мм рт.ст.	
9	Якому значенню Kt/V слід віддати перевагу (1)? Яке значення Kt/V вказує на абсолютне неадекватний гемодіаліз (2)? а) $Kt/V = 1$. б) $Kt/V < 1$. в) $Kt/V > 1,2$. г) $Kt/V < 1,2$. д) $Kt/V = 1,2$ е) $Kt/V = 10$. ж) Рівень Kt/V не впливає на адекватність процесу гемодіалізу.	
10	Які параметри входять в моніторинг екстракорпоральної циркуляції на панелі монітора? а) Тиск в кров'яній лінії до насоса крові. б) Швидкість перфузії крові. в) Тиск крові в венозній пастці. г) Детектор рівня крові і бульбашок повітря у венозній пастці. д) Всі перераховані Які з перерахованих параметрів є елементами моніторингу діалізата? а) Потік діалізата. б) Температура діалізата. в) Кондуктивно діалізата. г) Детектор витоку крові. д) Всі відповіді вірні	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач з визначення параметрів гемодіалізу: транспорту речовин через біологічні мембрани, дифузії, осмосу; кліренсу діалізатора по сечовині, коефіцієнту масопереносу, швидкості ультрафільтрації, трансмембранного тиску та індексу діалітичної дози.

Задача № 1	
	Визначити ступінь зниження сечовини в діалізаторі. Концентрація сечовини до гемодіалізу 20 ммоль/л, після – 5 ммоль/л. Відповідь: 75% Приклад розв'язування:

	Ступінь зниження сечовини URR (urea reduction rate) визначається за формулою: $URR \% = 100 \left(1 - \frac{\text{рівень сечовини після гемодіалізу}}{\text{рівень сечовини до гемодіалізу}} \right)$ $URR \% = 100 \left(1 - 5/20 \right) = 75\%$
Задача № 2	
	Визначити кліренс діалізатора по сечовині за умов: швидкість перфузії крові 200 мл/хв, ультрафільтрація відсутня, рівень сечовини на вході в діалізатор 20 ммоль/л, на виході – 5 ммоль/л. Як зміниться кліренс сечовини при ультрафільтрації зі швидкістю 600 мл/год? Відповідь: при $Q_f = 0$ $Cl = 150$ мл/хв; при $Q_f = 600$ мл/год $Cl = 152,5$ мл/хв.
Задача № 3	
	Дослідження кліренсів діалізатора при $Q_b = 200$ мл/хв, $Q_d = 500$ мл/хв, $Q_f = 0$ дало наступні результати: кліренс сечовини 220 мл/хв, креатиніну 200 мл/хв, фосфату 180 мл/хв. Чи відповідають отримані результати реальним показникам? Відповідь: Кліренси по мочевині и креатиніну не відповідають дійсності. Кліренс по фосфату 180 мл/хв відповідає. Чому?
Задача № 4	
	Визначити швидкість ультрафільтрації для хворого з надлишковою вагою 2 кг при тривалості процедури гемодіалізу 4 години. Відповідь: 500 мл/год.
Задача № 5	
	Коефіцієнт ультрафільтрації діалізатора 4,6 мл/год·мм.рт.ст. Яким має бути трансмембранний тиск, аби швидкість ультрафільтрації склала 600 мл/год? Відповідь: $TMP = 130,4$ мм.рт.ст
Задача № 6	
	За 30 хвилин гемодіалізу об'єм ультрафільтрації склав 600 мл при трансмембранному тиску 200 мм.рт.ст.. Визначити коефіцієнт ультрафільтрації діалізатора. Відповідь: $K_{uf} = 6$ мл/ч·мм.рт.ст.
Задача № 7	
	Тиск крові на вході в діалізатор 200 мм.рт.ст., на виході 150 мм.рт.ст. Тиск діалізату на вході 70 мм.рт.ст., на виході 90 мм.рт.ст. Визначити трансмембранний тиск.

	Відповідь: $\text{TMP} = 95 \text{ мм.рт.ст.}$
Задача № 8	
	На вході в діалізатор тиск крові 260 мм.рт.ст., на виході 200 мм.рт.ст. яким має бути середній тиск діалізату, аби швидкість ультрафільтрації дорівнювала нулю? Відповідь: 230 мм.рт.ст.
Задача № 9	
	Коефіцієнт ультрафільтрації діалізатора $K_{uf} = 2,8 \text{ мл/ год}\cdot\text{мм.рт.ст.}$. Чи можна на цьому діалізаторі отримати швидкість ультрафільтрації 1600 мл/год? Відповідь пояснити/ Відповідь: не можна. Чому?
Задача № 10	
	Фактичний кліренс діалізатора по сечовині при тривалості гемодіалізу 4 години для хворого вагою 60 кг становить 220 мл/хв. Який в даному випадку індекс діалісної дози? Відповідь: $K_{t/V} = 1,47$.
Задача № 11	
	Визначити співвідношення часу гемодіалізу для двох хворих вагою 45 і 90 кг за умови рівності індексів діалісної дози. Використовуються однакові діалізатори при однаковій швидкості перфузії крові. Відповідь: Для хворого вагою 90 кг вдвічі більше
Задача № 12	
	Хворому вагою 80 кг при кліренсі 200 мл/хв проводиться стандартний 4-годинний гемодіаліз. Наскільки треба збільшити час гемодіалізу, аби індекс діалісної дози склав 1,25? Відповідь: збільшити на 1 год

Література для підготовки:

1. Стецюк Є.А. Основи гемодіалізу. Під редакцією проф. Е.Б. Мазо. Видавничий Дім «ГЕОТАР-МЕД.», 2001. – 392 с.
2. Григор'єва Л. І., Томілін Ю.А. Основи біофізики і біомеханіки: навч. посіб. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – 300 с.

НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ТЕРМОДИНАМІКИ ТА МАСОПЕРЕНОСУ В МЕДИЧНИХ ПРИЛАДАХ І СИСТЕМАХ:

1. Біотермодинаміка та масоперенос як наука та сфера виробництва

- 1.1. Термодинамічний метод вивчення медико-біологічних систем.
- 1.2. Термодинаміка відкритих систем — основний напрям для математичного моделювання з метою наукових досліджень біосистем.
- 1.3. Напрямки наукових досліджень з біотермодинаміки в біомедичній інженерії.
- 1.4. Напрямки світового виробництва в галузі біомедичної інженерії, що базуються на біотермодинаміці.
- 1.5. Обладнання, що використовує принципи термодинаміки та тепло- і масопереносу, для підтримки життєвоважливих функцій організму.

2. Теоретичні основи та практичне використання біотермодинаміки та масопереносу в медицині

- 2.1. Засоби та методи термічного впливу на організм та тканини з лікувальною терапевтичною та хірургічною метою.
- 2.2. Засоби та методи, обладнання для підтримки роботи нирки.
- 2.3. Засоби та методи, обладнання для підтримки роботи серця.
- 2.4. Засоби та методи, обладнання для підтримки роботи легень, дихання.

3. Особливості дослідження біооб'єктів, теплові процеси та масоперенос в біологічних системах

- 3.1. Дослідження впливу на біологічні тканини теплового поля та методи вимірювання температури.
- 3.2. Принципи моделювання теплообміну в біологічних тканинах при дії

на організм факторів фізичної природи.

3.3. Принципи моделювання масопереносу в біологічних системах.

4. Медичні біотехнології у вирішенні актуальних медичних проблем

4.1. Пошук термодинамічних шляхів лікування онкологічних захворювань.

4.2. Штучне серце, відновлення гемодинаміки після трансплантації.

4.3. Термодинамічне сповільнення метаболічних процесів в організмі людини для збільшення часу з метою виконання оперативних та терапевтичних заходів і запобігання гіпоксії.

4.4. Кріоконсервація – інноваційна методика збереження донорських органів.

4.5. Інші новітні біотехнології для вирішення актуальних медичних проблем.

5. Термодинамічні та фізіологічні процеси, модульовані лікувальними фізичними електричними факторами. Фізичні основи лікування за допомогою нагрітих середовищ. Фізіотерапевтичне обладнання.

5.1. Терморегуляційні механізми застосування факторів електромагнітної природи. Електротерапія. Магнітотерапія. Параметри впливу, оцінка ефективності і безпеки.

5.2. Терморегуляційні механізми застосування оптичного випромінювання (фототерапія). Параметри впливу, оцінка ефективності і безпеки.

5.3. Терморегуляційні механізми застосування факторів механічної та термічної природи. Параметри впливу та оцінка ефективності і безпеки.

Роботу рекомендується виконувати за наступним шаблоном, який включає такі розділи:

Вступ	1
Основна частина	
1.1. <i>Загальна характеристика застосування методики (приладу) в медицині, її мета та завдання.....</i>	3
1.2. <i>Теоретична частина. Детальний опис біофізики та основних законів термодинаміки чи масопереносу, що лежать в основі роботи методики (приладу).....</i>	5
1.3. <i>Технічна частина. Опис обладнання, що застосовується. Схеми, принцип роботи, технічні характеристики роботи та застосування в лікуванні.....</i>	8
1.4. <i>Практична частина. Реалізація методики у світі, в Україні, в дослідженнях. Перспективи.....</i>	18
Висновки	19
Список використаних джерел	21
Додатки	
Презентація до захисту	

ЗАГАЛЬНИЙ СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чалий О.В. Медична та біологічна фізика / О.В. Чалий, Я.В. Цехмістер, Б.Т. Агапов та ін.; за ред. проф. О.В. Чалого. – Вінниця: Нова книга, 2013. – 528 с.
2. Сливко Е.І./ Медична і біологічна фізика: Навчальний посібник для студентів спеціальності 222 «Медицина»/ Е.І. Сливко, О.З. Мельнікова, О.З.Іванченко, Н.С. Біляк. - Запоріжжя, 2018.- 291 с.
3. Абакумов В.Г. Реєстрація, обробка та контроль біомедичних сигналів / В.Г. Абакумов, З.Ю. Готра, С.М. Злепко та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 352 с. 5.
4. Кулик А.Я., Нікольський О.І., Ревенок В.І. Схемотехніка медичної електронної апаратури / Монографія. – Вінниця: ВНМУ, 2020. – 167 с.
5. Кулик А.Я. Комп'ютерні системи та інформаційні технології / Монографія. / А.Я.Кулик, В.В. Мотигін, Я.А. Кулик, Б.П. Книш – Вінниця: ВНМУ, 2020. – 299 с.
6. Яворовський О.П., Охорона праці в медичній галузі: підручник / О.П. Яворовський, І.В. Сергета, Ю.О. Паустовський, В.І. Зенкіна та ін. – Всеукраїнське спеціалізоване видавництво «Медицина», 2021. – 488 с.
7. Булах І.Є. / Комп'ютерне моделювання у фармації: навчальний посібник (ВНЗ IV р. а.) / І.Є. Булах, Л.П. Войтенко, І.П. Кривенко. / – Всеукраїнське спеціалізоване видавництво «Медицина», 2017, 2-е вид., випр. – 208 с.
8. Мороз А.С. / Медична хімія / А.С. Мороз . – Нова Книга, 2013. – 776 с.
9. Ремізов А.Н. Медична та біологічна фізика: Підручник для вузів / А.Н. Ремізов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – 4-е вид., перераб. и доповн. – М.: Дрофа, 2003. – 560 с.
10. Тиманюк В.А., Животова Е.И. Біофізика: Підручник. – 2-е вид. – К.: ВД «Професіонал», 2004. – 704 с.
11. Кустовська О. В. Методологія системного підходу та наукових досліджень: Курс лекцій. – Тернопіль: Економічна думка, 2005. – 124 с.
12. Прилуцький Ю.І. Теорія інформації та її біологічні аспекти: навч. посіб. / Прилуцький Ю.І., Богуцька К.І., Ноздренко Д.М. – К.: ПЦ «Інтертехнодрук», 2006. – 92 с.
13. Личковський Е.І. Біофізика. Фізичні методи аналізу та метрологія: підручн. / Е.І. Личковський, В.О. Тіманюк, О.В. Чалий, Ю.Є. Лях, О.М. Животова. – Вінниця: Нова Книга, 2014. – 464 с.
14. Лопушанський Я.Й. Збірник задач і запитань з медичної і біологічної фізики: навч. посіб. – Вінниця: Нова Книга, 2010. – 584 с.

15. Огурцов А.Н., Близнюк О.Н. Фізико-хімічні основи біотехнології. Біотермодинаміка: Навч. посіб. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – 256 с.
16. Костюк П.Г., Зима В.Л., Магура І.С., Мірошніченко М.С., Шуба М.Ф. Біофізика: підруч. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2008. – 567 с.
17. Мухін В.М. Фізична реабілітація / Мухін В.М. – Київ. – 2000. - 423 с.
18. Клінічна фізіотерапія / За ред. В.В. Оржешковського. — К.: Здоров'я, 1994. – 215с.
19. Азнакаєв Е.Г. Біомедична інженерія (фундаментальні та прикладні аспекти): Навч. посіб. – К.: НАУ, 2007. – 392 с.
20. Герман И. Фізика організму людини. – Довгопрудний: Видавничий Дім «Інтелект», 2011. – 992 с.
21. Кащенко О.А., Фізіологія: навч. посіб. / О.А. Кащенко, О.М. Поспелов, С.Л. Ляшенко; за ред. проф. О.А. Шандри. – Одеса : ОНМедУ, 2013. – 288 с.
22. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. Молекулярна фізика: навч. посіб. – К.: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2007. – 462 с.
23. Артюхов В.Г., Ковалева Т.А., Наквасина М.А., Башарина О.В., Путинцева О.В., Шмелев В.П. Біофізика: підручник. – М.: Академ., 2009. – 294 с.
24. Стецюк Є.А. Основи гемодіалізу. Під редакцією проф. Е.Б. Мазо. Видавничий Дім «ГЕОТАР-МЕД.», 2001. – 392 с.
25. Григор'єва Л. І., Томілін Ю.А. Основи біофізики і біомеханіки: навч. посіб. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – 300 с.
26. Комплексна контрольна робота. Основи біомедичної інженерії – 1. Біотермодинаміка та масоперенос. / Максименко В.Б., Тарасова Л.Д., Сичик М.М. //Методичні вказівки до виконання комплексної контрольної роботи для студентів напряму підготовки 6.051402 – «Біомедична інженерія». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – 20 с.
27. Основи біомедичної інженерії – 1. Біотермодинаміка та масоперенос. / Максименко В.Б., Тарасова Л.Д., Сичик М.М. // Методичні вказівки до проведення практичних занять для студентів напряму підготовки 6.051402 – «Біомедична інженерія». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – 43 с.