

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

Л.Є. Калашнікова, М.М. Сичик

ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

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

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент	<i>Богомолів М.Ф.</i> , к.т.н., доц., доцент кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, <i>Дубко А.Г.</i> , к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
Відповідальний редактор	<i>Зубчук В.І.</i> , 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)*

ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

«Термодинаміка біологічних процесів і систем»: 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 данні (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. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ.....	5
2. ОСОБЛИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯК ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ.....	12
3. ЗВОРОТНІ ТА НЕЗВОРОТНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ. ПОНЯТТЯ ПРО СТАН СИСТЕМИ.....	13
4. ОСНОВНІ ПОСТУЛАТИ (ПОХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ) ТЕРМОДИНАМІКИ І БІОТЕРМОДИНАМІКИ	17
5. ПЕРШИЙ ПОЧАТОК ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ЖИВИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ.....	18
6. ЕНТАЛЬПІЯ. ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ РЕАКЦІЇ.....	21
7. ЕНТРОПІЯ. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ.....	30
8. ВІЛЬНА ЕНЕРГІЯ ГІБСА ДЛЯ БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ.....	34
9. ПОНЯТТЯ ГРАДІЄНТА В ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТА СИСТЕМАХ.....	36
10. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ЗАКРІПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ	38
ЗАГАЛЬНИЙ СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65

ВСТУП

Існування будь-якого живого організму пов'язане з безперервним обміном речовин, енергетичним та інформаційним з навколишнім середовищем. Енергія, що приходить в систему витрачається на синтез біоенергетичних з'єднань, на підтримку хімічних, астматичних і електричних потенціалів, а так само їх градієнтів.

У процесі життєдіяльності відбувається безперервне перетворення одних видів енергії в інші. Необхідно використовувати термодинаміку, як науку що вивчає найбільш загальні закономірності перетворень різних видів енергії.

Термодинаміка вивчає системи, що володіють тепловою енергією, яка може переноситися. Визначається кількість витраченої системою теплоти і кількість виробленої системою роботи. Термодинаміка досліджує можливості поширення теплової енергії, і якщо це можливо, то напрям поширення. Рух і перетворення енергії є загальною властивістю енергії, відбувається як в біологічних, так і в небіологічних системах. Однак в біологічних системах ці процеси мають свої особливості.

Дисципліна «Термодинаміка біологічних процесів і систем» дає знання межі застосовності термодинаміки, класифікації термодинамічних параметрів, розмірності і порядки основних термодинамічних констант, поняття і параметрів, розмірності постулатів термодинаміки, основні закони термодинаміки і їх наслідки, основні характеристичні функції і умови рівноваги. Дисципліна формує системні знання про зв'язок перетворення поживних речовин і вивільнення тепла, перетворення енергії при взаємодії живого організму з навколишнім середовищем.

«Термодинаміка біологічних процесів і систем» є фундаментом для розуміння питань про природу теплоти як міру руху матерії, про сили, пов'язані з теплою, про загальне значення закону збереження енергії і перетворення енергії, про мимовільні процеси і взаємоперетворення речовин.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Основними біологічними системами є *клітина, організм, популяція, вид, екосистема, біогеоценоз, біосфера*. Формування та узагальнення знань про біосистеми можна організовувати в таких аспектах, як структурна організація, функціональна організація та основні властивості.

Структурна організація біосистеми – це наявний упорядкований стан існування складових частин системи. Аналіз структурної організації здійснюється за допомогою методу класифікації – багатоступінчастого, послідовного поділу досліджуваної системи з метою отримання нових знань щодо її побудови, складу, зв'язків. Опис структури біосистеми – це виділення елементів (підсистем, компонентів) біосистеми, які будуть досліджуватися, тобто проведення морфологічного аналізу. Оскільки біосистеми є відкритими, через них проходять потоки речовини, енергії та інформації і вони зазнають постійного впливу зовнішнього середовища, у структурі біосистем доцільно виділяти біотичний та абіотичний компоненти.

Функціональна організація біосистеми – це злагоджене функціонування взаємопов'язаних складових частин системи. Вивчення функціональної організації здійснюється шляхом визначення функцій, які кожен із виділених елементів (підсистем, компонентів) виконує в досліджуваному цілісному процесі, тобто проведення функціонального аналізу.

Основні властивості біосистем виражають сутність системи у відношеннях з іншими системами, тому для визначення властивостей слід установити закономірні взаємозв'язки, які формуються між виділеними елементами (підсистемами, компонентами) в умовах їх функціонування як цілісності, тобто провести структурний аналіз.

Клітина – *елементарна біологічна система, основна структурна й функціональна одиниця живого, яка здатна до саморегуляції, самооновлення та самовідтворення. Структурна організація.* Основними компонентами клітини

є поверхневий апарат, цитоплазма і ядро (нуклеоїд), які побудовані з певних підсистем та елементів. Існують два типи організації клітин – прокаріотичний та еукаріотичний. Базовим рівнем організації для клітин є молекулярний рівень.

Функціональні зв'язки. Будь-яка функція клітини є наслідком узгодженої роботи всіх її частин і компонентів. Організація та функціонування всіх компонентів клітини пов'язані, насамперед, з біологічними мембранами. Зовнішні взаємозв'язки між клітинами відбуваються шляхом виділення хімічних речовин і утворення контактів, а внутрішні між елементами клітини забезпечуються гіалоплазмою. Більшість клітин багатоклітинного організму спеціалізуються на виконанні однієї головної функції. *Основні властивості.* Клітині притаманні такі самі властивості, як іншим біосистемам, але вони будуть відрізнятися простішим характером здійснення. Клітина є елементарною біосистемою, оскільки саме на рівні клітин проявляються всі властивості життя. Визначаються ці властивості структурно- функціональною організацією біомембран, цитоплазми і ядра.

Організм – відкрита біологічна система, яка завдяки системам регуляції та пристосувальним механізмам може зберігати свою цілісність і упорядкованість та відносно самостійно існувати в певному середовищі життя.

Структурна організація. В одноклітинних і колоніальних організмів - клітинний рівень організації, багатоклітинні організми поєднують клітинний, тканинний, органний і системний рівні, завдяки чому організменний рівень організації живих систем є найрізноманітнішим з-поміж усіх інших. Елементарною структурно-функціональною одиницею організмів є клітина.

Функціональні зв'язки: а) оскільки в здійсненні певної життєвої функції беруть участь клітини, тканини, органи, системи органів, то дана функція буде мати складніший і досконаліший характер; б) спеціалізація складових частин організму на виконанні певної функції робить їх залежними від інших частин, тому разом із диференціацією відбуваються процеси інтеграції, завдяки яким

між частинами формуються внутрішні зв'язки (фізіологічні, генетичні, нервові, гуморальні та ін.), що обумовлюють підпорядкування їх організму як цілісній системі.

Основні властивості. Оскільки у властивостях об'єкта відображається його внутрішня структурно- функціональна сутність, то робимо висновок про ускладнення й урізноманітнення основних властивостей організмів (наприклад, розмноження може бути нестатевим, статевим і вегетативним).

Популяція – *генетично відкрита біологічна система, група вільносхрещуваних між собою особин одного виду, що проживають тривалий час на певній території і відносно ізольовані від інших таких самих груп.*

Структурна організація. Організми поділяються на групи залежно від віку, статі, розподілу в просторі, особливостей поведінки тощо, що дозволяє виділяти, відповідно, *вікову, статеву, просторову, етологічну* структуру популяцій. Цей поділ обумовлює виокремлення таких внутрішньопопуляційних підрозділів, як екоелементи, біотиби. Елементарною структурною одиницею популяцій є організми.

Функціональні зв'язки. Різна структура популяцій обумовлює різноманітні взаємозв'язки між організмами (наприклад, репродуктивні, трофічні, топічні, етологічні та ін.), що дозволяє їм досить часто утворювати *співдружні формування* (наприклад, родини, зграї, табуни, колонії) для досконалішого здійснення життєвих функцій. *Основні властивості* залежать від таких ознак популяцій, як чисельність, народжуваність, смертність, приріст, біомаса, густота, які, значною мірою, формуються під впливом умов існування організмів популяцій. Кожна популяція як цілісна система володіє механізмами саморегуляції, самооновлення й самовідтворення особин, що входять до неї, тому в межах популяцій існують складні системи сигналів, які визначають поведінку однієї особини стосовно іншої.

Вид – *сукупність популяцій особин, яким властиві: а) морфофізіологічна подібність; б) вільне внутрішньовидове схрещування; в) утворення плідного*

потомства; г) несхрещуваність з іншими видами; д) спільна територія існування – ареал; е) пристосованість до умов існування в межах ареалу; є) спільне походження.

Структурна організація. У межах ареалу виду виділяють такі основні внутрішньовидові структури: підвиди, екотипи і популяції. Елементарною структурною одиницею виду є популяції.

Функціональні зв'язки: а) реалізація життєвих функцій на рівні виду здійснюється відмінними організмами, індивідуальні особливості яких забезпечуються неспадковою і спадковою мінливістю; б) великого значення набуває внутрішньовидова конкуренція, що спричиняє природній добір; в) розширюються зовнішні екологічні зв'язки з абіотичним, біотичним і антропогенним середовищем.

Основні властивості. Основним критерієм, який визначає специфічність властивостей виду, є генетична єдність різноманітностей всередині виду і репродуктивна ізоляція (несхрещуваність) від інших видів, що робить вид *генетично закритою системою*. Єдність різноманітностей забезпечує високий ступінь *стійкості й адаптивності*, що робить вид основною формою організації живої матерії.

Екосистема – сукупність організмів різних видів та середовища їхнього існування, що пов'язані обміном речовини, енергії та інформації.

Біогеоценоз – певна територія з однорідними умовами існування, населена організмами різних видів, поєднаних між собою середовищем існування колообігом речовин і потоком енергії.

Структурна організація. У межах біосистем цього рангу виділяють біотичний (біоценоз) та абіотичний (біотоп) компоненти, пов'язані між собою колообігом речовин. Елементарною структурною одиницею є види, які утворюють угруповання.

Функціональні зв'язки: а) функціонування біосистеми в цілому забезпечують "внутрішній" біологічний колообіг речовин і "зовнішні" потоки

речовини, енергії та інформації; б) зв'язки між популяціями біоценозу можуть бути дуже різноманітними (прямими і непрямими; симбіотичними, нейтральними й антибіотичними; трофічними і топічними), але найважливішими є трофічні та енергетичні.

Основними властивостями є цілісність, відкритість, стійкість, саморегуляція і самовідтворення.

Біосфера – єдино глобально екосистема вищого порядку, склад, структура і властивості якої визначаються діяльністю організмів. Структурна організація: а) біотичний компонент представлений живою речовиною – сукупністю організмів нашої планети; б) абіотичний компонент включає хімічні складові та фізичні умови геологічних оболонок: атмо-, гідро-і літосфери; б) елементарною структурно-функціональною одиницею є біогеоценози.

Функціональні зв'язки:

а) біо- і геокомпоненти пов'язані між собою колообігом речовин у вигляді біогеохімічних циклів, найважливішими властивостями яких є відкритість і незамкненість;

б) основними функціями живої речовини в біосфері є окиснювально-відновна, концентраційна та газова.

Основні властивості визначаються властивостями живої речовини.

Область біологічної термодинаміки зосереджена на принципах хімічної термодинаміки в біології та біохімії. Принципи, що охоплюються включають перший закон термодинаміки, то другий закон термодинаміки, вільної енергії Гіббса, статистичної термодинаміки, кінетики реакції і на гіпотезах про походження життя. В даний час біологічна термодинаміка відноситься себе з вивченням внутрішніх біохімічних динаміків як: АТФ гідролізу, стабільність білка, ДНК - сполучною, дифузійною мембраною, кінетики ферментів та іншими такими суттєвими енергетичними контрольованими шляхами.

З точки зору термодинаміки, кількість енергії, здатної виконувати роботу

під час хімічної реакції, вимірюється кількісно зміна вільної енергії Гіббса. Фізичний біолог Альфред Лотка спробував поєднати зміни вільної енергії Гіббса з еволюційною теорією.

Перетворення енергії в біологічних системах

Сонце є основним джерелом енергії для живих організмів. Деякі живі організми, як рослини потребують сонячному світлі безпосередньо в той час як інші організми, як люди можуть отримувати енергію від сонця побічно. Існує, однак доказів того, що деякі бактерії можуть процвітати в несприятливих умовах навколишнього середовища, як Антарктиду в якості доказу синьо-зелених водоростей під товстим шаром льоду в озерах. Незалежно від того, який тип живих істот, всі живі організми повинні захопити, без перетворюють, зберігати і використовувати енергію, щоб жити.

Співвідношення між енергією входить сонячного світла і його довжини хвилі X або частоти ν , задається де h являє собою постійну Планка (6.63×10^{-34} Js) і c швидкістю світла (2.998×10^8 м / с). Рослини пастки цієї енергія від сонячного світла і пройти фотосинтез, ефективно перетворювати сонячну енергію в хімічну енергію. Для того, щоб передати енергію ще раз, тварини харчуються рослинами і використовувати енергію перетравлюється рослинних матеріалів для створення біологічних макромолекул.

Біологічна термодинаміка є кількісним дослідженням енергетичних трансдукції, які відбуваються в або між живими організмами, структурами і клітинами і природою і 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 фенотипическим ознакою варто енергії інвестицій він вимагає.

Історія Німецько-британський лікар і біохімік Ханс Кребс 1957 книга "Енергетичні перетворення в живій матерії (написані з Гансом Корнбергом) була першою великою публікацією з термодинаміки біохімічних реакцій. Крім того, додаток містило перші опубліковану термодинамічні таблиці, написаних

Кеннета Burton, щоб утримувати константи рівноваги і вільну енергію Гіббса формацій для хімічних сполук, здатних розрахувати біохімічні реакції, які ще не відбулися. Нерівноважна термодинаміка була застосована для пояснення того, як біологічні організми можуть розвиватися від розладу. Ілля Пригожин розробив методи термодинамічного лікування таких систем. Він назвав ці системи дисипативних систем, так як вони формуються і підтримуються дисипативними процесами, які обмінюються енергією між системою та її оточенням, і тому, що вони зникають, якщо цей обмін припиняється. Можна сказати, що вони живуть в симбіозі з навколишнім їх середовищем. Енергетичні перетворення в біології залежать перш за все від фотосинтезу. Повна енергія захоплена фотосинтезу в зелених рослин від сонячного випромінювання становить близько 2×10^{23} джоулів енергії в рік. Річна енергія захопленої фотосинтезом в зелених рослинах становить близько 4% від загальної сонячної енергії, яка досягає Землю. Енергетичні перетворення в біологічних спільнотах, що оточують гідротермальні жерла виключення; вони окислюються сірки, отримуючи енергію за допомогою хемосинтезу, а не фотосинтезу.

Термодинамічна теорія еволюції

Біологічна еволюція може бути пояснена за допомогою термодинамічної теорії. Чотири закони термодинаміки використовуються для об'єднують біологічної теорії за еволюції. Перший закон термодинаміки говорить, що держави, що енергія не може бути створена або знищена. Ніяка життя не може створювати енергію, але повинні отримати його через його оточення. Другий закон термодинаміки говорить, що енергія може бути перетворена, і що відбувається кожен день в життєвих формах. Як організми беруть енергію з навколишнього середовища, вони можуть перетворити його в корисну енергію. Це є основою трофічних динаміки.

Загальний приклад є те, що відкрита система може бути визначений як будь-який екосистемі, яка рухається в бік максимального розсіювання енергії. Всі речі прагнуть до максимальної ентропії виробництва, що з точки зору

еволюції, відбувається в змінах в ДНК для збільшення біорізноманіття. Таким чином, різноманітність може бути пов'язаний з другим законом термодинаміки. Різноманітність також можна стверджувати, що процес дифузії, який дифундує в стороні динамічної рівноваги, щоб максимізувати ентропію. Таким чином, термодинаміка може пояснити напрямок і швидкість еволюції поряд з напрямком і швидкістю послідовності.

2. 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.

3. 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 впливає 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 які параметри системи впливають на їх існування.

Розрізняють стаціонарний, рівноважний і нерівноважний стан.

Стаціонарним станом називається стан системи, при якому параметри

системи постійні в кожній цій 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

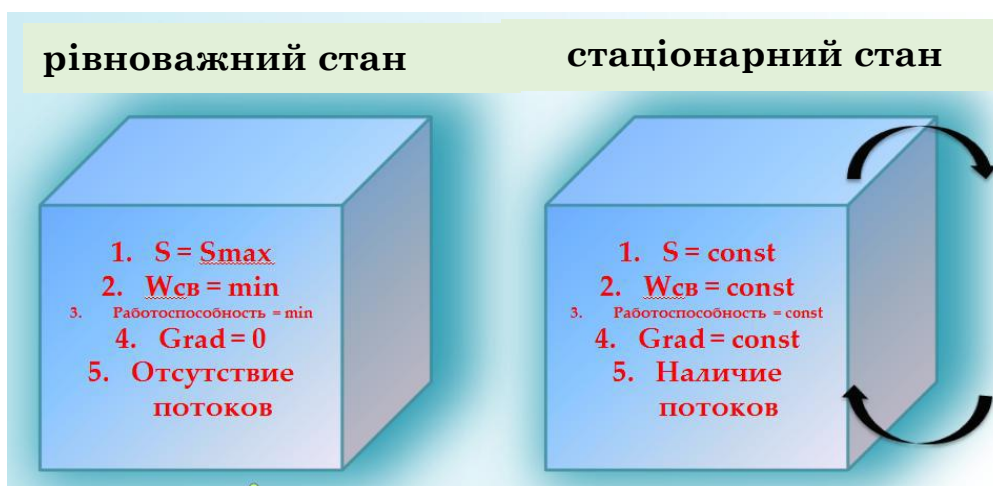


Рис.6. Порівняльна схема стаціонарного та рівноважного стану

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 приходиться через досить великий проміжок часу в умовах ізоляції від навколишнього середовища, після чого параметри стану системи вже не змінюються з часом.

При термодинамічній рівновазі можливістю 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:

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 ДЛЯ ЖИВИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

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.

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.

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.

6. 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 «нагриваю»). 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.

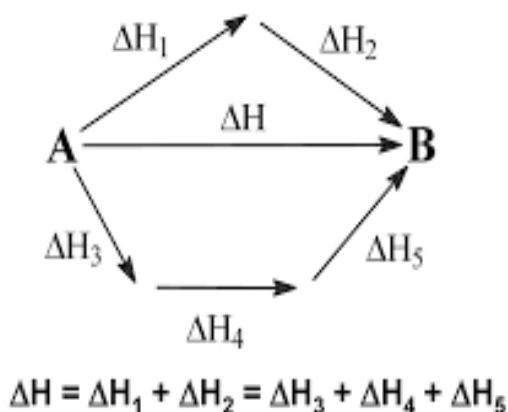
Термодинамічна основа закону Гесса - незалежність теплового ефекту хімічної реакції від способу проведення.

- 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: $T=298\text{K}$ (або $t=25^\circ\text{C}$) і $P=101325\text{Па}$, 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 10^5Па
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).

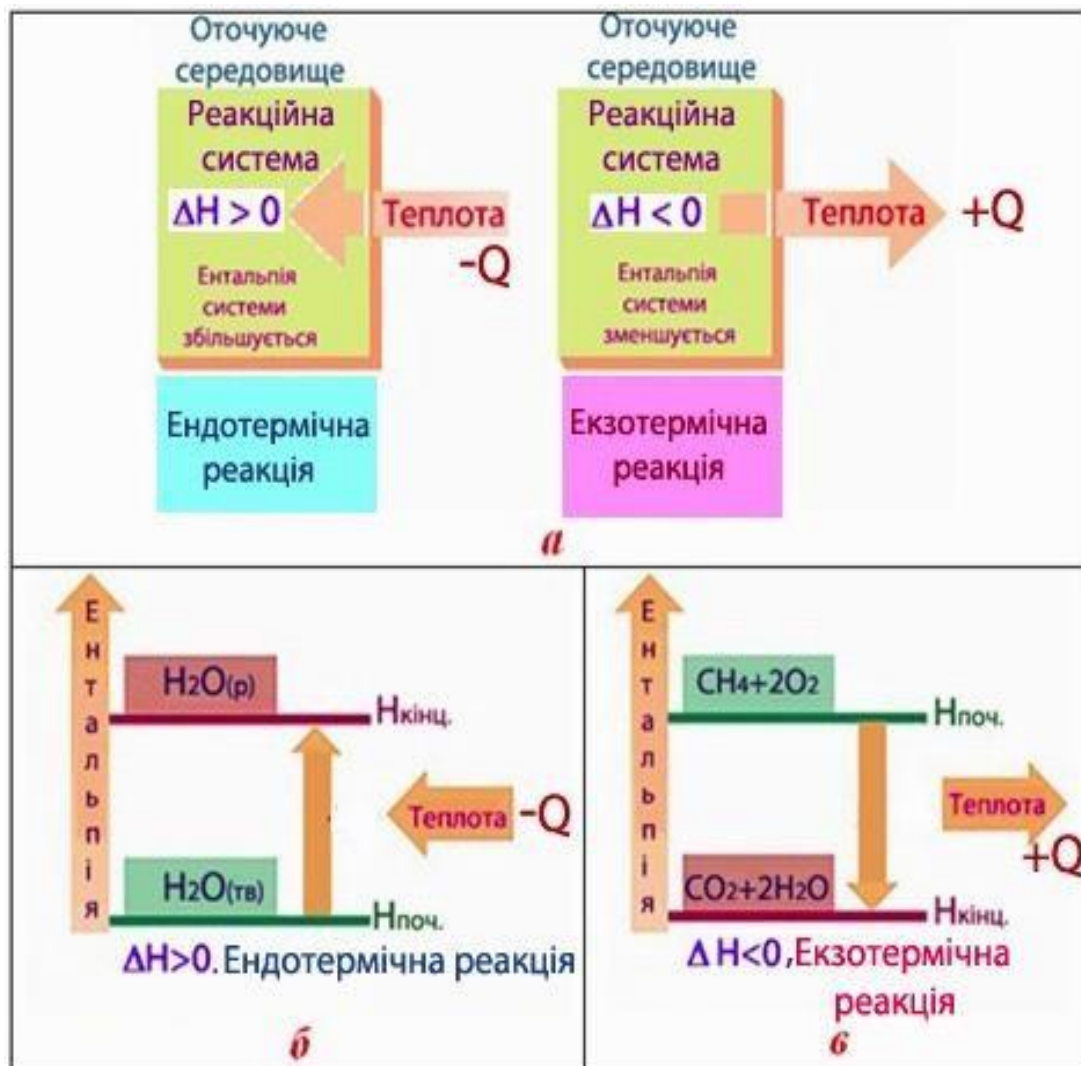


Рисунок 8. – Ендо- і екзотермічні реакції: а) співвідношення між знаком теплоти ($\pm Q$) і змінення ентальпії ($\pm \Delta H$); б) ендотермічний процес фазового перетворення $H_2O_{(тв)} \rightarrow H_2O_{(р)}$; в) екзотермічна реакція $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Ентальпію хімічної реакції $\Delta H_{х.р.}$ не слід ототожнювати з теплою 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 ($-Q$) підчас 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.

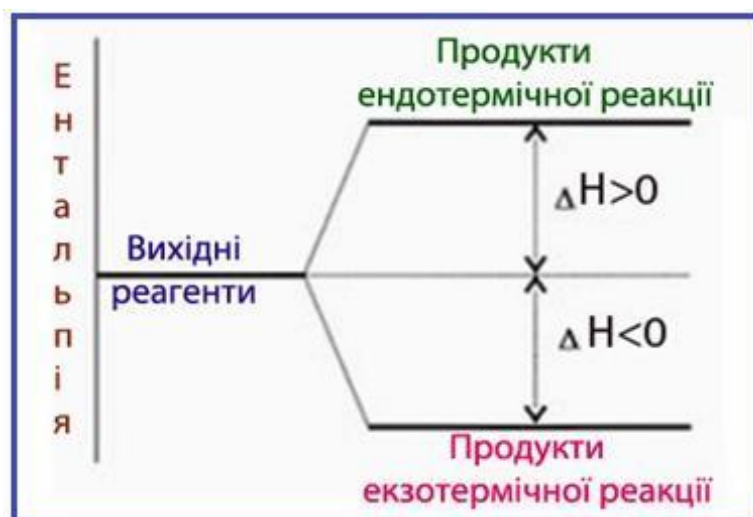


Рисунок 9. – Змінення ентальпії внаслідок екзо- і ендотермічної реакції

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 10^5Па , вважають такою, що дорівнює нулю.

Значення стандартних ентальпій утворення ($\Delta H_{\text{f},298}^0$) 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

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

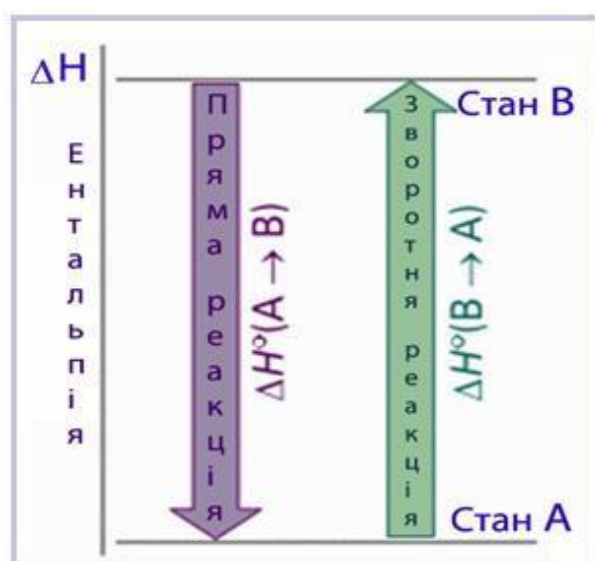


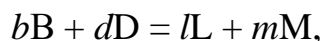
Рисунок 10. – Перший наслідок закону Гесса

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

ентальній 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.

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.

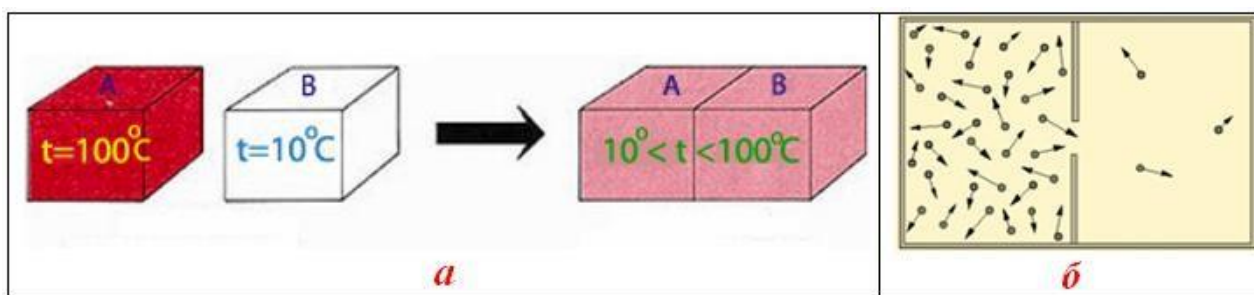


Рис.11.– Самочинні фізичні процеси:

- 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.

7. ЕНТРОПІЯ. 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 простягається 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 початкові 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 ($S_2 > S_1, \Delta S > 0$)

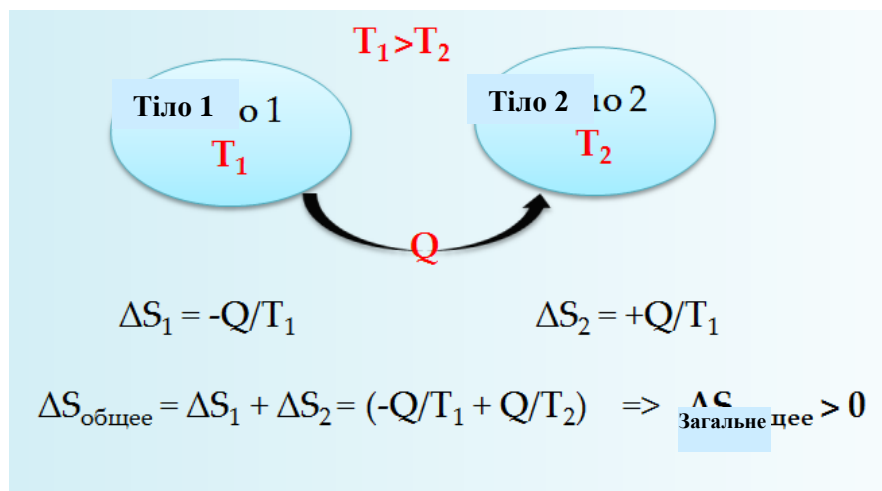


Рис. 12. Передача тепла від одного тіла іншому

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.

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.

8. ВІЛЬНА ЕНЕРГІЯ ГІБСА ДЛЯ БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

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

$$\mathbf{G = U + PV - ST}$$

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:

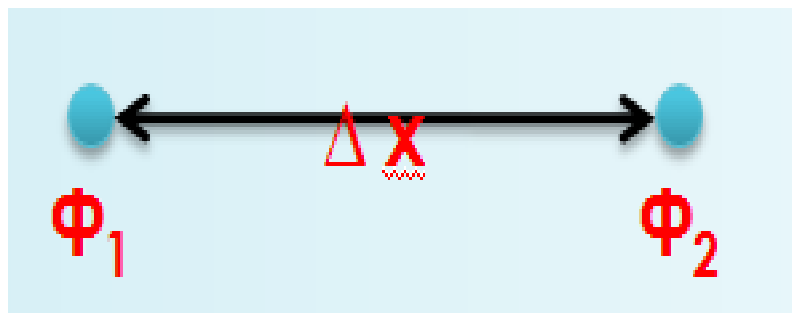
- за низьких температур $\Delta H > T\Delta S$, напрямок реакції визначається ентальпійним фактором: $\Delta G \approx \Delta H$, тобто знаком ΔH .
- за високих температур: $T\Delta S > \Delta H$, тому напрямок визначається ентропійним фактором (прагненням до розриву зв'язків): $\Delta G \approx T\Delta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

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

9. ПОНЯТТЯ ГРАДІЄНТА В ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ І СИСТЕМАХ

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 градиєнт. Таким чином, градиєнт є своєрідним депо енергії

Зв'язок вільної енергії та градиєнта 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:

μ^0 - 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.

10. 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; в. множина функцій, на якій визначене задане відношення з фіксованими властивостями; г. комплекс взаємопов'язаних елементів, що утворюють цілісність; д. утворює особливу єдність з функціями та є елементом «надсистеми»; е. комплекс елементів, що взаємодіє з зовнішнім середовищем;	

	г. структура та множина функцій, які підпорядковані глобальній меті.	
2	<p>Дайте відповідне визначення наступним властивостям системи:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. комунікативність, 2. рівновага, 3. стійкість, 4. адаптація. <p>а. здатність системи повертатись до попереднього стану, після того як вона була з нього виведена.</p> <p>б. ступінь зв'язку системи з зовнішнім середовищем.</p> <p>с. здатність системи зберігати деякий стан при відсутності збурень.</p> <p>д. здатність системи до цілеспрямованого пристосування.</p>	
3	<p>Дайте відповідне визначення наступним поняттям:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. цілісність, 2. ієрархічність, 3. структуризація, 4. множинність, 5. системність. <p>а. наявність множини (принаймні двох) елементів, які розташовані на основі підпорядкування елементів нижчого рівня елементам вищого рівня.</p> <p>б. дозволяє використовувати множину кібернетичних, економічних і математичних моделей для опису окремих елементів і системи в цілому.</p> <p>с. дозволяє розглядати систему одночасно і як єдине ціле, і як підсистему вищестоячих рівнів.</p> <p>д. дозволяє аналізувати елементи системи і їх взаємозв'язки в рамках конкретної організаційної структури.</p> <p>е. властивість об'єкта володіти всіма ознаками системи.</p>	
4	<p>Декомпозиція – це:</p> <ol style="list-style-type: none"> 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 системотворчих відношень; д. ускладнення системи, надміру простої для виконання визначених функцій; е. розподіл функцій системи за класами з метою її кращого пізнання; 	

	<ul style="list-style-type: none"> 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	<p>Функція системи – це:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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	<p>Структура – це:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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	<p>Ієрархія – це:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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	<p>Стан системи – це:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. значення характеристик системи, важливі для цілей дослідження; 	

	<ul style="list-style-type: none"> b. зафіксовані значення характеристик системи, важливі для цілей дослідження; c. нефіксовані значення характеристик системи; d. показники, без яких неможливе нормальне функціонування системи. 	
9	<p>Емерджентність – це така властивість складної системи, яка:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 складної системи 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	<p>Синергізм полягає в тому, що:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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., Богуцька 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: Диференційне 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; д. 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: а. безмежно зростає; б. приймає постійне в часі мінімальне позитивне значення; с. безмежно спадає; д. приймає від'ємне значення; е. дорівнює нулю.	
5	Дисипативна функція β визначає: а. швидкість зростання ентропії у системі, в якій протікають необоротні процеси; б. швидкість зменшення ентропії у системі, в якій протікають необоротні процеси; с. стан системи; д. швидкість зростання ентропії у системі, в якій протікають оборотні процеси.	
6	Постійність ентропії означає, що зміна стану а. безповоротно, б. оборотно.	
7	При зменшенні ентропії впорядкованість системи а. підвищується б. знижується	
8	З пониженням температури міра безладу а. збільшується б. зменшується	
9	В рівнянні $Q = \Delta U + A$ прийнято вважати $A > 0$: а. Якщо робота здійснюється над системою; б. Якщо роботу здійснює сама система.	
10	Параметр, що характеризує середню кінетичну енергію теплового руху молекул: а. температура; б. абсолютна температура; с. ентальпія; д. 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	
	<p>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.</p> <p>Відповідь: 310 кВт</p> <p>Приклад розв'язування: Дисипативна функція β характеризує швидкість зростання ентропії в системі, в якій відбуваються необоротні процеси:</p> $\beta = T \frac{dS}{dt} = (273 + 37) \frac{10}{10} = 310 \text{ кВт}.$
Задача № 2	
	<p>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 °С.</p> <p>Відповідь: 5 кДж/К</p>
Задача № 3	
	<p>Визначити зміну ентропії при плавленні 300 г льоду. Питома теплота плавлення льоду становить 335 кДж/кг.</p> <p>Відповідь: 368 Дж/К</p>
Задача № 4	
	<p>Розрахувати зміну ентропії при нагріві 100 г води від 0 до 15°C . Середня питома теплоємність в цьому діапазоні температур дорівнює $4,193 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$.</p> <p>Відповідь: 22,4 Дж/К</p>
Задача № 5	
	<p>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.</p> <p>Відповідь: 6 Вт</p>
Задача № 6	
	<p>Визначити, скільки теплоти втрачає кров при її штучному охолодженні</p>

	<p>на 5°C 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.</p> <p>Відповідь: 1646 Вт</p>
--	---

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.

Приклад тестових завдань:

№	Питання	Відповідь
1	<p>Який термодинамічний принцип лежить в основі методики контактної (1) та перфузійної (2) гіпотермії:</p> <p>a) конвекція; b) тепломасообмін; c) теплопровідність.</p>	
2	<p>Диференціальним рівнянням теплопровідності називається виражений в математичній формі перший закон термодинаміки (розшифрувати буквені позначення):</p> $dQ + dQ_s = dU + dA,$ <p>де</p> <p>dQ –;</p> <p>dQ_s –;</p> <p>dU –;</p> <p>dA –</p>	
3	<p>Складові характеристики теплового балансу при терморегуляції організму:</p> <p>a) конвекція, теплопровідність, тепломасообмін; b) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання; c) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання, тепломасообмін; d) конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання, біомасоперенос.</p>	
4	<p>Назвіть складові, що входять у тепловий баланс елемента тканини:</p> <p>a) кількість теплоти, що виділяється в результаті обмінних метаболічних процесів; b) тепловий потік в результаті теплопровідності; c) конвективне перенесення теплоти кров'ю; d) конвективний тепловий потік між поверхнею тіла і середовищем; e) радіаційний тепловий потік випромінюванням; f) тепловий потік при випаровуванні поту з поверхні шкіри; g) тепловий потік з дихальних шляхів.</p>	
5	<p>Конвекція (1), масообмін (2), теплопровідність (3), теплове випромінювання (4) – це:</p> <p>a) перенесення тепла внаслідок безладного теплового руху мікрочастинок, що безпосередньо стикаються одна з одною (рух молекул в газах і крапельних рідинах, коливання атомів</p>	

	<p>у кристалічній решітці твердих тіл, дифузія вільних електронів в металах).</p> <p>б) 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.</p> <p>с) процес поширення електромагнітних коливань з різною довжиною хвиль, обумовлене тепловим рухом атомів або молекул випромінюючого тіла.</p> <p>д) мимовільний і незворотний процес перенесення частини речовини в просторі з неоднорідним полем хімічного потенціалу в напрямку зменшення цього хімічного потенціалу.</p>	
6	<p>1. Енергію через вакуум можна передати ...</p> <p>2. Енергія передається через шар нерухомої речовини ...</p> <p>3. Енергія переходить від більш нагрітого тіла до менш нагрітого тіла ...</p> <p>4. Енергія переноситься струменями або потоками речовини ...</p> <p>а) при теплообміні випромінюванням.</p> <p>б) при теплообміні конвекцією.</p> <p>с) при теплообміні теплопровідністю.</p> <p>д) при будь-якому способі теплообміну.</p>	
7	<p>1. Перший закон термодинаміки стверджує, що ...</p> <p>2. Закон Кірхгофа пророкує, що ...</p> <p>3. В закономірності Ньютона помічено, що ...</p> <p>4. Другий закон термодинаміки говорить, що ...</p> <p>а) потужність теплообміну між тілами залежить від різниці їх температур.</p> <p>б) теплообмін відбувається тільки між нагрітими тілами.</p> <p>с) внутрішню енергію тіла можна змінити роботою або теплопередачею.</p> <p>д) тіла, добре випромінюючі енергію, будуть і добре її поглинати.</p> <p>е) теплота не може самостійно переходити від холодного тіла до гарячого.</p>	
8	<p>Температурне поле - це:</p> <p>а) кількість теплоти, передана в одиницю часу через одиницю поверхні;</p> <p>б) геометричне місце точок, які мають в даний момент часу</p>	

	однакову температуру; с) сукупність значень температур у всіх точках розглянутого тіла в даний момент часу; d) теплова енергія, що передається від одного тіла до іншого протягом якогось часу.	
9	Ізотермічні поверхні: a) не перетинаються; b) перетинаються; c) збігаються одна з іншою; d) замикаються на себе.	
10	Тепловий потік, проходить через тришарову плоску стінку, буде: a) більше в чотири рази для 1-го шару, ніж для третього шару; b) більше в два рази для 2-го шару, ніж для третього шару; c) менше в три рази для 1-го шару, ніж для третього шару; d) менше в два рази для 2-го шару, ніж для третього шару; e) 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 $x = 0$, $T = T_{кр} = C$, при $x = \delta$, $T = T_d$.

Підставивши ці значення матимемо:

	$T_D = -\frac{q}{\lambda} \delta + T_{KP}$ <p>Питомий тепловий потік через мембрану :</p> $q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{KP} - T_D) = \frac{0,2}{10^{-3}} (37 - 24) = 2600 \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$
Задача № 2	
	<p>Визначити корисну потужність м'язу, якщо при його скороченні впродовж 0,3 с виділяється 5,4 кДж теплоти з коефіцієнтом корисної дії 25%.</p> <p>Відповідь: 6 кВт</p>
Задача № 3	
	<p>Який максимальний вантаж може підняти м'яз на висоту 1 м за рахунок енергії 1 кДж при коефіцієнті корисної дії 30%.</p> <p>Відповідь: $m = 30,6 \text{ кг}$</p>
Задача № 4	
	<p>Визначити теплопродукцію м'язу, якщо м'яз здатний підняти вантаж масою 100 г на висоту 30 см з коефіцієнтом корисної дії 20%.</p> <p>Відповідь: 1,2 Дж</p>
Задача № 5	
	<p>Яка була б температура м'язу, якби він працював як теплова машина з коефіцієнтом корисної дії $\eta = 40\%$ при температурі довкілля 20°C.</p> <p>Відповідь: 215°C</p>
Задача № 6	
	<p>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°C; температура довкілля 20°C; коефіцієнт тепловіддачі $50 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.</p> <p>Відповідь: 650 Вт/м^2</p>
Задача № 7	
	<p>Визначити, на скільки процентів збільшується енергетична світимість тіла людини при підвищенні температури з 36°C до 39°C?</p> <p>Відповідь: 3,94%</p>
Задача № 8	
	<p>Визначити, на скільки процентів збільшується енергетична світимість тіла людини при підвищенні температури з 37°C до 38°C?</p>

	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 °С. Середня температура тіла 34 °С. 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°С, температура стоп 34 °С, площа контакту кожної стопи з льодом 0,02 м ² , 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 $T_{д} = 24^\circ\text{C}$. 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 $q = 2600$ Вт / м ² . Визначити різницю температур між поверхнями мембрани, якщо вона виготовлена з полікарбонату з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,2$ Вт / м · град . Процес вважати стаціонарним. Відповідь: $\Delta T = 13$ 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/м^2 та коефіцієнті теплопровідності матеріалу $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$. Відповідь: 3 град.
Задача № 17	
	Визначити градієнт температури у стінці матеріалу завтовшки 5 мм при щільності теплового потоку 90 Вт/м^2 та коефіцієнті теплопровідності матеріалу $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$. 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. БІОТЕРМОДИНАМІКА ФІЗІОТЕРАПЕВТИЧНОГО МЕДИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.

Питання, що виносяться на тестові роботи: Електричні і магнітні властивості біологічних живих тканин. Оптичні властивості тканин організму.

Механічні властивості тканин організму. Теплофізичні властивості тканин організму. Основи біоелектрогенеза і поширення збудження. Принципи роботи фізіотерапевтичного обладнання, параметри, оцінка ефективності та безпечності. Механізми застосування постійного електричного струму: гальванізація; електрофорез лікарських речовин. Механізми застосування постійного імпульсного електричного струму: електродіагностика і електростимуляція; імпульсна електротерапія; електросонотерапія; транскраніальна електроанальгезія; діадинамотерапія; короткоімпульсна електроанальгезія; електропунктура. Механізми застосування електричного поля: франклінізація; електростатичний масаж; ультрависокочастотна терапія. Механізми застосування електромагнітних випромінювань: надвисокочастотна електротерапія; дециметровохвильова терапія; сантиметровохвильова терапія. Застосування оптичного випромінювання (фототерапія): інфрачервоне опромінення; хромотерапія; ультрафіолетове опромінення; лазеротерапія; фотодинамічна терапія. Застосування факторів механічної та термічної природи: вібротерапія; ультразвукова терапія; лікувальний ультрафонофорез; кріотерапія. Організація роботи фізіотерапевтичного відділення (кабінету): обладнання фізіотерапевтичного кабінету; техніка безпеки при проведенні фізіотерапевтичних процедур.

№	Запитання	Відповідь
1	Для здійснення електрофорезу використовують: а) постійне магнітне поле б) змінне магнітне поле в) постійний електричний струм г) змінний електричний струм д) електромагнітні хвилі	
2	Активний опір відрізняється від реактивного тим, що а) зумовлює виділення теплоти в навколишнє середовище б) залежить від частоти коливання електричної напруги в) залежить від індуктивності електричного ланцюга г) залежить від ємності електричного ланцюга д) залежить від ємності і індуктивності ланцюга	
3	Біологічні тканини мають такі види електричного опору: а) ємнісний і індуктивний	

	<ul style="list-style-type: none"> b) активний і ємнісний c) активний і індуктивний d) тільки активний e) тільки індуктивний 	
4	<p>Постійний струм відрізняється від змінного струму тим, що:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) він має постійну частоту коливань b) він має постійну амплітуду коливань c) він має постійну частоту і амплітуду коливань d) не змінюється у часі за силою і напрямком e) постійно змінює амплітуду і напрямок 	
5	<p>З якого електроду хворому потрібно вводити за допомогою електрофорезу новокаїн, частинки якого мають позитивний заряд:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) з відвідного b) з обох електродів c) з катода d) з анода e) не має значення 	
6	<p>На дії постійного струму заснований такий метод терапії:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) діатермія b) гальванізація c) індуктотермія d) реографія e) дарсонвалізація 	
7	<p>Реографічне дослідження проводять за допомогою:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) високочастотного ультразвуку b) постійного електричного струму c) змінного струму низької частоти d) змінного струму високої частоти e) низькочастотного ультразвуку 	
8	<p>Найбільший електричний опір має:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) кров b) суха шкіра c) м'яз d) печінка e) лімфа 	
9	<p>Імпеданс - це:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) силова характеристика магнітного поля b) густина змінного електричного струму c) силова характеристика електричного поля d) повний опір ланцюгу змінного струму e) енергетична характеристика електричного поля 	
10	<p>Реографію застосовують для:</p>	

	<ul style="list-style-type: none"> a) вимірювання в'язкості крові b) визначення кровонаповнення органів c) вимірювання швидкості крові d) введення ліків через неушкоджену шкіру e) лікування больових синдромів 	
11	<p>Формула Кедрова пов'язує зміни об'єму органу при його кровонаповненні зі зміною:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) частоти змінного струму b) електричної напруги c) індуктивного опору органу d) реактивного опору органу e) активного опору органу 	
12	<p>Дисперсія імпедансу біологічних тканин - це його залежність від:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) прикладеної напруги b) частоти змінного струму c) питомої опору d) індуктивності органів e) іонного складу органу 	
13	<p>Найбільшу електропровідністю серед названих біологічних тканин і органів має:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) жирова тканина b) кров c) кісткова тканина d) суха шкіра e) печінка 	
14	<p>Магнітне поле відрізняється від електричного тим, що воно:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) чинить силовий вплив на електричні заряди b) діє тільки на рухомі електричні заряди c) може бути представлено силовими лініями d) може бути використано у медичній практиці e) може бути зареєстровано за допомогою приладів 	
15	<p>В цьому методі використовують дію імпульсних магнітних полів на органи:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) магнітокардіографія b) магнітоенцефалографія c) магнітотерапія d) магнітостимуляція e) магнітографія 	
16	<p>Найбільш ефективно діє на органи і тканини тіла людини магнітне поле певної напруженості, якщо воно:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) постійне b) змінне 	

	<ul style="list-style-type: none"> c) імпульсне d) вихрове 	
17	<p>Метод, який дозволяє безконтактно досліджувати процес поширення збудження в серці, називається:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) реографія b) імпедансометрія c) плетизмографія d) магнітостимуляція e) магнітокардіографія 	
18	<p>Лікувальний ефект магнітостимуляції пов'язаний з виникненням в тканинах під дією магнітного поля:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) парамагнетиків b) катіонів та аніонів c) вихрових електричних струмів d) струмів провідності e) макроструктурної поляризації 	
19	<p>При здійсненні цього методу на тіло людини впливають електричним струмом високої частоти:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) УВЧ – терапія b) індуктотермія c) діатермія d) мікрохвильова терапія e) електрофорез 	
20	<p>Для СВЧ - терапії використовують:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) високочастотний електричний струм b) високочастотні електромагнітні хвилі c) високочастотне змінне магнітне поле d) низькочастотний електричний струм e) постійне магнітне поле 	
21	<p>При індуктотермії переважній вплив на органи має:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) електричне поле високої частоти b) магнітне поле високої частоти c) електричний струм високої частоти d) постійне магнітне поле e) електричний струм низької частоти 	
22	<p>Для прогрівання тканин тіла людини використовують:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) ампліпульстерапію b) гальванізацію c) електрофорез d) УВЧ – терапію e) діадинамотерапію 	
23	<p>Високочастотна терапія відрізняється від низькочастотної терапії:</p>	

	<ul style="list-style-type: none"> a) зменшеною силою струму, що проходить через тканини b) здатністю викликати подразнюючу дію на м'язи і нерви c) можливістю вводити в організм лікувальні препарати d) здатністю прогрівати біологічні тканини e) можливістю використання у домашньому лікуванні 	
24	<p>Фізичний фактор, який служить основою лікувальної дії УВЧ – терапії:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) магнітне поле високої частоти b) електричний струм високої частоти c) постійний електричний струм d) електричне поле високої частоти e) електричне поле низької частоти 	
25	<p>Метод низькочастотної терапії - це:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) діатермія b) дарсонвалізація c) ампліпульстерапія d) гальванізація e) індуктотермія 	
26	<p>Синхронний кардіостимулятор подає на серце електричні імпульси:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) постійної частоти b) високої частоти c) синусоїдальної форми d) у міру виникнення необхідності e) по зовнішньому сигналу 	
27	<p>Визначте, який з методів високочастотної терапії використовують для проведення хірургічних операцій:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) діатермія b) СВЧ-терапія c) дарсонвалізація d) індуктотермія e) УВЧ-терапія 	
28	<p>Основою дії електростимуляторів служить:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) теплова дію на тканини b) вібрація біологічних макромолекул c) прискорення хімічних реакцій d) деполаризація клітинних мембран e) поляризація біологічних тканин 	
29	<p>Найбільш тривалі імпульси використовуються при проведенні:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) гальванізації b) діадинамотерапії c) ампліпульстерапії 	

	d) електростимуляції e) діатермії	
30	Основним ефектом застосування електростимуляторів служить: a) нагрівання b) знеболювання c) руйнування d) поляризація e) збудження	

Питання, що виносяться на розв'язування задач: Розв'язання практичних задач на механізми застосування факторів та законів фізичної природи у роботі фізіотерапевтичного обладнання.

Задача № 1

Опір тканини постійному струму в ланцюзі між електродами при гальванізації становить 2000 Ом при площі прокладок 100 см^2 і щільності струму 0.1 мА/см^2 . Визначити напругу, яку має забезпечувати апарат гальванізації.

Відповідь: 20 В

Приклад розв'язування:

Густина струму визначається за формулою $j = I/S$. Звідси $I = j \cdot S$. Використовуючи закон Ома для ділянки електричного кола, знаходимо напругу:

$$U = I \cdot R = j \cdot S \cdot R = 0.1 \cdot 10^{-3} / 10^{-4} \cdot 100 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 = 20 \text{ (В)}$$

Задача № 2

На скільки відсотків зміниться частота ультразвуку при відбиванні його від рухомих еритроцитів в артерії? Середню швидкість руху еритроцитів прийняти рівною $v_0 = 40 \text{ см/с}$.

Відповідь: 0,05 %

Задача № 3

Електроди, накладені на шкіру, з'єднані з генератором прямокутних імпульсів (це означає, що створюване генератором напруга різко зростає до певного значення, потім залишається постійним заданий час, після якого знову падає до нуля). Дослідження порогових реакцій шкіри показало, що величина хронаксії дорівнює $0,82 \text{ мс}$ і відповідне їй значення подразнювального струму дорівнює 21 мА . На основі цих даних

	<p>написати вираз, що встановлює зв'язок між величиною порогового струму і часом його дії.</p> <p>Відповідь: $J = (8,61 \cdot 10^{-6})/t + 10,5 \cdot 10^{-3}$ (А)</p>
Задача № 4	
	<p>Визначити величину ЕРС самоіндукції, яка виникає в кільцевому електромагніті індуктивністю $L = 0,5$ Гн, що застосовується в установці для електрофорезу, якщо зміна сили струму в ньому від $I_1 = 0,2$ до $I_2 = 0,5$ А відбувається за $\Delta t = 0,01$ с.</p> <p>Відповідь: 15 В</p>
Задача № 5	
	<p>УЗ-хвиля з частотою 5 МГц проходить з м'яких тканин в кістку. Визначити довжину хвилі λ в обох середовищах, якщо швидкість УЗ в першому середовищі $v_1 = 1500$ м/с, а в другому $v_2 = 3500$ м/с.</p> <p>Відповідь: $3 \cdot 10^{-4}$ м, $7 \cdot 10^{-4}$ м</p>
Задача № 6	
	<p>Опір зразка м'язової тканини вимірюється при пропусканні через нього спочатку постійного, а потім змінного струму. При якій частоті змінного струму повний опір тканини буде в 3 рази більше величини її активного, омичного опору, рівного 850 Ом? Ємність тканини дорівнює 0,01 мкФ.</p> <p>Відповідь: 660 кГц</p>
Задача № 7	
	<p>Визначити величину магнітного потоку, що пронизує тіло пацієнта при проведенні магнітотерапії при індукції поля $B = 0,1$ Тл, вважаючи площу поверхні тіла, що входить в зону дії випромінювачів, рівну $S = 0,2$ м². Вважати, що опромінювана поверхня розташована перпендикулярно вектору індукції поля.</p> <p>Відповідь: 0,02 Вб</p>
Задача № 8	
	<p>При лікуванні електростатичним душем на електродах електричної машини прикладена різниця потенціалів $\Delta \phi = 100$ кВ. Визначити, який заряд q проходить між електродами за час однієї процедури лікування, якщо відомо, що сили електричного поля при цьому здійснюють роботу $A = 1800$ Дж.</p> <p>Відповідь: 18 кКл</p>
Задача № 9	
	<p>При проведенні процедури гальванізації величина постійного струму</p>

	через пацієнта не повинна перевищувати $I = 50$ мА. Яким має бути гранично допустиме значення напруги на електродах, якщо електроопір тіла людини становить $R = 1,2$ кОм? Відповідь: 60 В
Задача № 10	
	Магнітотерапія суглобів проводиться за допомогою кільцевого електромагніту площею поперечного перерізу $S = 100$ см ² . Яку кількість витків містить котушка, якщо при зміні магнітної індукції на $\Delta\Phi = 0,2$ Тл протягом $\Delta t = 0,005$ с в ній збуджується ЕРС $E = 12$ В? Відповідь: 30
Задача № 11	
	Визначити величину енергії магнітного поля в кільцевому електромагніті, що застосовується для магнітотерапії, якщо при силі струму $I = 1$ А в ньому виникає магнітний потік $\Phi = 0,2$ Вб. Відповідь: 0,1 Дж
Задача № 12	
	Напруга мережі, яка живить медичний апарат, $U = 220$ В. Людина знаходиться на землі (на підлозі) і дотикається корпусу апарату. Опір тіла людини дорівнює $R_{\text{л}} = 1000$ Ом. Опір між провідником і людиною (через землю) одно $R_{\text{пр}} = 5$ кОм. В результаті пошкодження ізоляції провідник з'єднався на корпус апарату (стався пробій на корпус). Знайдіть напругу, яка буде на тілі людини, і силу струму, що протікатиме через неї, якщо апарат не заземлений. Відповідь: 36,7 В
Задача № 13	
	Яку напругу слід докласти до електродів при проведенні електрофорезу, щоб щільність струму не перевищувала $J = 0,05$ мА/см ² ? Опір ділянки тіла між електродами становить $R = 1,5$ кОм, площа електродів $S = 10$ см ² . Відповідь: 0,75 В
Задача № 14	
	При проведенні магнітотерапії суглобів використовується котушка індуктивністю $L = 0,1$ Гн і опором $R = 6$ Ом. Визначити енергію магнітного поля котушки, якщо під час процедури на ній підтримується напруга $U = 12$ В. Відповідь: 0,2 Дж
Задача № 15	
	При введенні рідких лікарських препаратів через шкіру (електрофорез)

	<p>використовується постійний струм напругою $U = 6$ В, який подається на електроди площею $S = 12$ см². Опір ділянки тіла між електродами становить $R = 104$ Ом. Визначити щільність струму електрофорезу.</p> <p>Відповідь: $0,5$ А/м²</p>
Задача № 16	
	<p>Доплерівський зсув частоти при відображенні ультразвукового імпульсу від рухомих зі швидкістю $v_0 = 75$ см/с еритроцитів дорівнює $\Delta\nu = 50$ Гц. Визначити частоту випромінювання ультразвукового генератора.</p> <p>Відповідь: 50 кГц</p>
Задача № 17	
	<p>При гальванізації через ділянку тіла за 20 хв. проходить електричний заряд 60 Кл. Визначити середню щільність струму, якщо площа електродів 400 см².</p> <p>Відповідь: $1,25$ А/м²</p>
Задача № 18	
	<p>При роботі апарату для франклізації щосекунди в 1 см³ повітря утворюється $n = 500000$ легких аероіонів. Визначити роботу іонізації, необхідну для створення в $V = 225$ см³ повітря такої ж кількості аероіонів за час лікувального сеансу ($t = 15$ хв). Потенціал іонізації молекул повітря вважати рівним $\varphi = 13,54$ В. Умовно прийняти повітря однорідним газом.</p> <p>Відповідь: $2,2 \cdot 10^{-7}$ Дж</p>
Задача № 19	
	<p>Для прогріву м'язової тканини на плоскі електроди подається напруга $U = U_0 \sin \omega t$ з амплітудою $U_0 = 250$ В и частотою $f = 10^6$ Гц. Активний опір даної ланки кола $R = 10^3$ Ом, ємністю $C = 5 \cdot 10^{-8}$ Ф. Визначити кількість тепла, виділившогось в об'ємі тканини між електродами за період коливань T та за час проведення процедури $t = 10$ хв.</p> <p>Відповідь: $3,24 \cdot 10^{-5}$ Дж, $1,94 \cdot 10^4$ Дж</p>
Задача № 20	
	<p>Іонофорез застосовується для введення лікарських речовин в тіло людини. Визначити кількість одноразово іонізованих іонів лікарської речовини, введеної хворому за час $t = 10$ хв при щільності Струму $j = 0,05$ мА/см² з електрода площею $S = 5$ см².</p> <p>Відповідь: $9,4 \cdot 10^{17}$</p>
Задача № 21	
	<p>Доплерівський зсув частоти при відображенні ультразвукового імпульсу</p>

	<p>від рухомих еритроцитів дорівнює $\Delta\nu = 50$ Гц, частота випромінювання ультразвукового генератора дорівнює $\Delta\nu = 50$ Гц. Визначити швидкість кровотоку в судині.</p> <p>Відповідь: 0,357 м/с</p>
Задача № 22	
	<p>При діатермії печінки один електрод розміром 240 см^2 накладають спереду на область печінки, а другий - позаду навпроти першого. Сила струму між електродами 1,1 А. Процедуру проводять 15 хв. Яка кількість тепла виділиться в укладеному обсязі печінки товщина 5 см? Питомий опір печінки $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.</p> <p>Відповідь: 22,7 кДж</p>
Задача № 23	
	<p>При проведенні процедури гальванізації на електроди площею $S = 5 \text{ см}^2$ подається напруга $U = 4 \text{ В}$. Ділянка тіла людини між електродами складається з м'язової тканини товщиною $l_m = 3 \text{ см}$, укладеної між двома шарами зволоженої фізрозчином шкіри товщиною $l_{ш} = 0,5 \text{ мм}$ кожен. Визначити величину струму гальванізації, вважаючи питомий опір вологої шкіри рівним $\rho_{ш} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а м'язової тканини $\rho_m = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.</p> <p>Відповідь: 20 мА</p>
Задача № 24	
	<p>Апарат для гальванізації АГН -5 створює щільність струму $0,12 \text{ мА/см}^2$. Яка кількість електрики проходить через тіло, якщо накладені на поверхню шкіри електроди мають площу $1,5 \text{ дм}^2$ і процедура гальванізації триває 20 хв? Який опір ділянки тіла, якщо до електродів прикладена напруга 45 В?</p> <p>Відповідь: 21,6 Кл, 2,5 кОм</p>
Задача № 25	
	<p>Яка кількість теплоти виділиться за 10 хв. в $0,5 \text{ дм}^3$ тканини при УВЧ-терапії, если ефективна напруженість електричного поля между електрода 350 В/м? Питомий опір тканини $8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.</p> <p>Відповідь: 2,296 кДж</p>

Література для підготовки:

1. Мухін В.М. Фізична реабілітація / Мухін В.М. – Київ. – 2000. - 423 с.
2. Клінічна фізіотерапія / За ред. В.В. Оржешковського. — К.: Здоров'я, 1994. – 215с.

3. Азнакаєв Е.Г. Біомедична інженерія (фундаментальні та прикладні аспекти): Навч. посіб. – К.: НАУ, 2007. – 392 с.

4. Чалий О.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів вищих медичних закладів освіти III–IV рівнів акредитації. – К.: «ВПОЛ» 1999. – 425 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 рішенні 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 безпечності.

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

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

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. Тиманюк, 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 «ХПИ», 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.