

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ЩОДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «БІОФІЗИКА»  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ  
ЗА НАПРЯМОМ 6.040106 – «БІОТЕХНОЛОГІЯ»

КРЕМЕНЧУК 2015

Методичні вказівки щодо практичних занять з навчальної дисципліни  
«Біофізика» для студентів денної та заочної форм навчання за напрямом  
6.040106 – «Біотехнологія»

Укладач: ст. викл. С.В. Дігтяр,

Рецензент д.б.н., проф. В.В. Никифоров

Кафедра біотехнології та здоров'я людини

Затверджено методичною радою КрНУ імені Михайла Остроградського

Протокол №            від

Голова методичної ради

проф. В.В. Костін

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Перелік практичних занять.....	5
Практичне заняття № 1 Потенціал спокою та потенціал дії.....	5
Практичне заняття № 2 Фізичні процеси в біологічних мембранах.....	11
Практичне заняття № 3 Гемодинаміка. Течія рідини. Біореологія.....	18
Практичне заняття № 4 Дія електричного поля на біоб'єкти.....	23
2. Критерії оцінювання знань студентів.....	31
Список літератури.....	32

## ВСТУП

Метою викладання дисципліни «Біофізика» є формування у студентів науково-практичного світогляду, що сприяє вивченню не тільки традиційних біотехнологічних процесів, але й розробці зовсім нових процесів.

Дана дисципліна включає теоретичну й прикладну біофізику, ґрунтується на застосуванні знань і методів біології, фізики, біохімії, генетики й хімічної технології, що дозволяє зрозуміти фізичні принципи функціонування клітин. Розглядаються приклади розв'язання задач тощо.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні вміти:

- використовувати знання біофізичних процесів на практиці;
- розв'язувати задачі з біофізики;
- застосовувати біофізичні закони задля пояснення біологічних процесів,

що відбуваються на різних рівнях органічного світу.

По закінченні курсу дисципліни «Біофізика» студенти повинні знати:

- визначення ключових термінів та понять;
- формули розрахунку біофізичних величин.

Для кожного із наведених у методичних вказівках практичного заняття визначено тему, мету і навчальні елементи. Практична частина виконується відповідно до поставлених завдань та з використанням рекомендованої літератури.

# 1. ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

## Практичне заняття № 1

### Тема. Потенціал спокою та потенціал дії

**Мета:** вивчити біофізичні принципи будови і функції молекул різноманітних речовин у клітинах, засвоїти основні правила розв'язання біофізичних задач, дати визначення навчальних елементів, навести характеристику біофізичних процесів.

**Навчальні елементи:** предмет біофізики, об'єкт біофізики, задачі біофізики, алгоритм розв'язання задач.

### Короткі теоретичні відомості

Види потенціалів. Дифузійні потенціали. Потенціали спокою та дії

Біоелектричні потенціали зумовлені потенціалами, що переважно виникають внаслідок нерівномірного розподілу іонів. Такими потенціалами є дифузійні, мембранні та фазові.

Дифузійні потенціали виникають на межі двох середовищ з різною рухливістю іонів або на межі двох розчинів одного й того ж електроліту з різною концентрацією.

Якщо в посудину з концентрованим розчином  $ZnSO_4$  налити слабкий розчин тієї ж солі, то іони  $Zn^+$  та  $SO_4^{-2}$  почнуть дифундувати через межу розподілу і переносити електричні заряди. Однак швидкість дифузії іонів буде різною. Маса іонів цинку менша, ніж маса іонів  $SO_4^{-2}$ , тому іони цинку випереджають іони кислотного залишку під час їх дифузії через межу як вгору, так і вниз. Проте концентрація нижнього розчину вища, і загалом знизу вгору буде перенесено більше іонів цинку, а на межі поділу виникне подвійний електричний шар. Додатний заряд зосередиться з боку менш концентрованого розчину. Між двома цими розчинами виникає дифузійна різниця потенціалів.

Якщо ці два розчини розділені між собою мембраною, тобто поруватою перегородкою, проникною лише для іонів одного виду, то біопотенціали називають мембранними. Причиною виникнення таких біопотенціалів може

бути різниця в діаметрах іонів, внаслідок чого великі іони не пройдуть через пори мембрани. Можливе також електричне відштовхування іонів одного знаку зарядженими кінцями дипольних молекул, що розміщені на поверхні мембран.

Мембранні потенціали можуть бути досить великими (50 – 55 мВ). Згідно зі сучасними уявленнями потенціали спокою, ушкодження, дії є за природою мембранними потенціалами.

Фазові потенціали виникають на межі двох фаз, які не змішуються. Такі потенціали виникають у клітинах на межі поділу різних фаз. За величиною вони незначні.

Потенціал спокою. Основною причиною появи біоелектричних потенціалів є неоднакова проникність для різних іонів і виникнення внаслідок цього несиметричного розподілу іонів з обох боків мембрани.

Причини нерівномірності розподілу іонів та вплив на потенціал спокою можуть бути різними в різних клітинах.

Основні іони, які перебувають у великих кількостях у цитоплазмі клітини та в зовнішньому середовищі, – це іони  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  та іони великого діаметра, наприклад аніони амінокислоти  $R^-$ .

Нехай усередині клітини (В) є іони  $K^+$  і  $R^-$ , а зовні (З) - лише іони  $K^+$ ,  $Cl^-$ . Іони калію і хлору дифундують через мембрану в обох напрямках а іон  $R^-$  залишається всередині клітини.

Однак умови дифузії для іонів калію і хлору різні, тому що дифузії останніх зі зовнішнього середовища в клітину перешкоджає від'ємний заряд аніонів  $R^-$ . Внаслідок цього концентрації іонів калію та хлору зовні і всередині клітини будуть неоднаковими.

Для більшості клітин нерівноважний розподіл іонів створюється внаслідок активного транспорту іонів через мембрану транспортними АТФазами.

Різниця концентрацій іонів усередині і ззовні клітин зумовлює виникнення потенціалу спокою на цитомембрані.

Різницю потенціалів між зовнішньою та внутрішньою поверхнями мембрани під час фізіологічного спокою клітини називають потенціалом спокою.

Аніони, для яких мембрана непроникна, концентруються біля внутрішньої її поверхні, створюючи від'ємний заряд, яким вони притягають зі зовнішнього середовища катіони калію, утворюють додатно заряджений шар на зовнішній поверхні мембрани. Наслідком цього є виникнення різниці потенціалів.

Таким чином, наявність градієнта концентрацій іонів калію і хлору з обох боків мембрани призводить до виникнення біоелектричного потенціалу спокою, який є характерною особливістю живої клітини і становить близько 90 мВ.

Окрім калію, на виникнення потенціалів спокою впливають ще й інші іони. Наприклад, різниця потенціалів, що виникає між ушкодженими та здоровими ділянками тканини, зумовлена градієнтом концентрації водневих іонів. Важливою є роль іонів  $\text{Na}^+$ . У біологічних рідинах іонів  $\text{Na}^+$  є багато, але їхнє значення для виникнення біопотенціалів відрізняється від значення іонів  $\text{K}^+$ . Усі живі клітини вміщують у 30 разів більше іонів калію, ніж їх є у міжклітинному середовищі, а іонів  $\text{Na}^+$  у клітині в 10 разів менше, ніж поза клітиною. Така різниця зумовлена різним ефективним діаметром іонів калію та натрію. Окрім цього, можна вважати, що, проникаючи всередину клітини, іони натрію виштовхуються з неї завдяки особливому механізмові, який називається натрієвою помпою. Проте невелика кількість іонів натрію все ж потрапляє у клітину, дещо зменшуючи потенціал спокою.

Через клітинну мембрану дифундують також іони хлору, концентрація яких для більшості тканин вища в міжклітинному середовищі, ніж у клітині. Це також впливає на загальну величину мембранного потенціалу.

З'ясовано, що в стані спокою проникність іонів  $\text{K}^+$  істотно більша, ніж  $\text{Na}^+$  і  $\text{Cl}^-$ , а саме: для аксона кальмара  $P_{\text{K}} : P_{\text{Na}} : P_{\text{Cl}} = 1:0,04:0,45$ . Це підтверджує основну роль іонів  $\text{K}^+$  у генерації потенціалу спокою.

Швидкість зменшення мембранного потенціалу до критичного значення залежить від різниці потенціалу між збудженими й незбудженими ділянками і від кабельних властивостей волокна: ємності та опору мембран, ємності аксоплазми і середовища.

Залежно від типу клітин та умов їх перебування може переважати один із названих

раніше механізмів виникнення мембранного потенціалу спокою, а саме:

стаціонарний потенціал виникає внаслідок неоднакової концентрації катіонів і аніонів усередині і ззовні клітини, яка підтримується роботою мембранних pomp;

потенціал, безпосередньо пов'язаний з роботою електрогенної помпи, виникає внаслідок активної роботи помпи і великого електричного опору мембрани, щоб струм, зумовлений активним транспортуванням, міг дорівнювати струму витоку за достатньо великого потенціалу. Цей механізм характерний для нервових клітин;

якщо проникність мембрани для будь-якого іона істотно перевищує її проникність для інших, то виникає рівноважний потенціал, характерний для нервових і м'язових клітин і близький до калієвого потенціалу

потенціал виникає, коли наявна висока концентрація непроникаючих іонів у клітині і висока проникність катіонів і аніонів, які входять до складу електроліту оточуючого середовища. Рівновага іонів хлору створює потенціал на мембранах еритроцитів..

Потенціал дії

У клітині внаслідок збудження виникає потенціал дії, який виявляється у швидкій зміні різниці потенціалів з обох боків клітинної мембрани. Потенціал дії спричиняє хвилю електричної активності, що поширюється нервовим або м'язовим волокном і . відіграє роль переносника інформації або сигналу.

Причина цього явища полягає в тому, що дія на ділянку клітинної мембрани будь-яким чинником (механічним, тепловим, електричним) з силою, яка переважає певну межу, зумовлює відкриття натрієвих іонних каналів, і



проникність цієї ділянки клітинної мембрани для іонів натрію зростає в сотні разів, тоді як для іонів калію – залишається незмінною. Внаслідок різниці концентрацій усередину клітини йде потік позитивно заряджених іонів натрію, які зменшують різницю потенціалів з обох боків мембрани. Це, у свою чергу, сприяє подальшому проникненню в клітину іонів натрію, які створюють на внутрішній поверхні мембрани, на ділянці дії чинника, позитивний заряд. Цей процес називається деполяризацією.

Судячи з результатів досліджень, для мембрани аксона кальмара в цей час відношення коефіцієнтів проникності  $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1:20:0,45$ . Якщо порівняємо його з таким співвідношенням для стану спокою:  $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1:0,04:0,45$ , то побачимо, що проникність іонів натрію зросла в 500 разів. Це підтверджує механізм виникнення потенціалу дії надходженням іонів  $Na^+$  у клітину.

Зростання проникності мембрани для іонів натрію триває короткий час, після чого вона зменшується, але водночас зростає її проникність для іонів калію, що сприяє відновленню потенціалу спокою. Це – фаза реполяризації. Тривалість потенціалу дії становить приблизно 2 мс, а швидкість його поширення – 100 м/с.

Наявність біоелектричних потенціалів є характерною ознакою життєдіяльності клітин, тому дія зовнішнього електричного поля на клітину не може не впливати на характер перебігу в ній життєвих процесів.

### **Задачі для розв'язання**

1.1 Яка різниця потенціалів існує на міжклітинній мембрані, якщо при перенесенні 10 мкмоль іонів натрію у міжклітинне середовище було виконано роботу  $A_{ел} = 57$  мДж?

1.2 При перенесенні 5 нмоль іонів калію з м'язового волокна жаби в міжклітинне середовище робота, яка витрачена на переборення сил електричного відштовхування, склала  $A_{ел} = 42,24$  мкДж. Розрахуйте різницю потенціалів  $\Delta\phi$  на цитоплазматичній мембрані.

1.3 Розрахуйте рівноважний мембранний потенціал  $\Delta\phi$ , який створюється іонами калію, якщо їх внутрішньоклітинна концентрація  $C_i = 500$  ммоль/л, зовнішньоклітинна –  $C_o = 10$  ммоль/л. Температура  $t = 27^\circ\text{C}$ .

1.4 Зовнішньо- і внутрішньоклітинна концентрації іонів хлора дорівнюють відповідно  $C_o = 500$  ммоль/л,  $C_i = 150$  ммоль/л. Потенціал спокою при цьому  $\Delta\phi = -32$  мВ. Розрахуйте температуру  $t$  клітини.

1.5 У скільки разів внутрішньоклітинна концентрація іонів калію повинна перевищувати зовнішню, щоб потенціал спокою складав  $\Delta\phi = -32$  мВ? Температура  $t = 37^\circ\text{C}$ .

1.6 Розрахуйте теоретичне значення максимуму потенціалу дії  $\Delta\phi$  при температурі  $t = 37^\circ\text{C}$ , вважаючи, що цитоплазматична мембрана нервового волокна в цих умовах є проникненою лише для іонів натрію. Зовнішньо- і внутрішньоклітинна концентрації натрію дорівнюють відповідно  $C_o = 150$  ммоль/л,  $C_i = 23$  ммоль/л.

1.7 Чому дорівнює напруженість електричного поля на мембрані у стані спокою, якщо концентрація йонів калія всередині клітини 125 ммоль/л, зовні – 2,5 ммоль/л, а товщина мембрани 8 нм?

1.8 Розрахуйте амплітуду потенціалу дії, якщо концентрація калія і натрія всередині клітини збудливої тканини відповідно: 125 ммоль/л, 1,5 ммоль/л, а зовні 2,5 ммоль/л та 125 ммоль/л.

1.9. Розрахувати для рівноважного стану мембранний потенціал, створюваний іонами  $\text{K}^+$ , знехтувати проникливістю йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{Cl}^-$ .

1.10. За який час потенціал дії розповсюджується на відстань, рівну  $S = 10$  см, якщо прийняти швидкість його розповсюдження  $v = 20$  м/с?

1.11. Приймаючи  $C_i/C_o = 100$ , температуру  $T = 300$  К, знайти потенціал спокою для одновалентного йону ( $|Z| = 1$ ).

1.12. Визначити, яка кількість одновалентних йонів повинно перейти із цитоплазми до неклітинного середовища для створення потенціалу спокою  $\phi_m \approx 120$  мВ? Прийняти площу поверхні клітини  $S = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>; питому електроємність мембрани (на одиницю площі)  $C_{\text{пит}} = 10^{-2}$  Ф/м<sup>2</sup>.

1.13. Біологічні мембрани знаходяться під дією електричного поля, створеного за рахунок різних концентрацій заряджених йонів ( $K^+$  і  $Na^+$ ) по різні її боки. Різниця потенціалів між цитоплазмою та позаклітинним середовищем досягає  $\Delta\phi = 100 \text{ мВ} = 10^{-1} \text{ В}$ , а товщина мембрани  $h = 10 \text{ нм} = 10^{-8} \text{ м}$ . Визначити: а) напруженість електричного поля в мембрані; б) до чого веде зменшення товщини мембрани?

### **Завдання до теми**

1. Поясніть біофізичний механізм дії отрути тетрадотоксину та місцевого анестетика тетраметиламонію.
2. Поясніть поняття «мембранний потенціал»  $\phi_m$ .
3. Вкажіть різницю між потенціалом спокою та потенціалом дії.

### **Контрольні питання**

1. Який транспорт йонів створює мембранну різницю потенціалів: пасивний чи активний?
2. Що більше: швидкість розповсюдження електричного сигналу по дротах морського телеграфу чи швидкість поширення нервового імпульсу по мембрані аксона? Чому?
3. Як співвідносяться проникливість мембрани аксону кальмара для різних йонів у спокої та при збудженні?

**Література:** [2, 3, 10].

## **Практичне заняття № 2**

### **Тема. Фізичні процеси в біологічних мембранах**

**Мета:** засвоїти принципи розрахунку щільності потоку речовини, дифундуючої через мембрану, дати визначення навчальних елементів.

**Навчальні елементи:** біологічні мембрани, потенціал поля заряду  $q$  в електроліті, рівноважна концентрація.

### **Короткі теоретичні відомості**

Рівняння Фіка, рівняння Теорелла, формула Нернста, рівняння Гольдмана – Ходжкіна – Катца, розрахунок потенціалу поля заряду  $q$  в електроліті

*Рівняння Фіка:*

$$J = -D \frac{dC}{dx},$$

де  $J$  – щільність потоку дифундууючої речовини,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $\frac{dC}{dx}$  – похідна від концентрації дифундууючої речовини в напрямку  $x$  (проекція градієнта концентрацій у напрямку  $x$ ).

*Рівняння Теорелла:*

$$J = -CU \frac{d\mu}{dx}.$$

де  $\mu$  – електрохімічний потенціал;

$$U = \frac{D}{RI}.$$

$I$  – рухомість, де  $R$  – молярна газова стала.

Середня величина зміщення молекули речовини в розчині:

$$\tilde{x} = 2Dt,$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $t$  – час.

*Характерний час встановлення рівноважної концентрації:*

$$t_{0,5} = 0,693 \frac{V}{pS}.$$

$V$  – об'єм клітини;  $S$  – площа поверхні клітинної мембрани;

$$P = \frac{D}{l} K$$

де  $P$  – коефіцієнт проникливості мембрани для даної речовини,  $l$  – товщина мембрани,  $K$  – коефіцієнт розподілу речовини.

*Формула Нернста:*

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_0}{C_i}.$$

Тут  $\Delta\varphi$  – рівноважний мембранний потенціал,  $C_0$  та  $C_i$  – концентрації даного йону ззовні і всередині клітини,  $F$  – стала Фарадея,  $Z$  – валентність йону.

*Рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца*

$$\varphi_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_0 + P_{Na} [Na^+]_0 + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_0},$$

де  $\varphi_m$  – мембранний потенціал,  $P_K$ ,  $P_{Na}$ ,  $P_{Cl}$  – проникливості мембрани для відповідних йонів,  $[K^+]_0$ ,  $[Na^+]_0$ ,  $[Cl^-]_0$  – концентрації йонів ззовні клітини,  $[K^+]_i$ ,  $[Na^+]_i$ ,  $[Cl^-]_i$  – концентрації цих же йонів всередині неї.

*Потенціал поля заряду  $q$  в електроліті:*

$$\varphi = \frac{q}{r} e^{-r/\delta},$$

де  $r$  – відстань,  $\delta$  – дебаївський радіус екранування.

$$\Delta = \sqrt{\frac{RT\varepsilon}{F^2 \sum_i Z_i^2 c_i}},$$

де  $Z_i$  – валентність йону,  $c_i$  – концентрація відповідного йону,  $\varepsilon$  – діелектрична проникливість розчинника.

### **Задачі для розв'язання**

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

2.2. Чому дорівнює щільність потоку формаміду через плазматичну мембрану *Chara ceratophylla*, товщина якої 8 нм, якщо коефіцієнт дифузії його складає  $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , концентрація формаміду в початковий момент часу ззовні дорівнювала  $2 \cdot 10^{-4}$  М, а всередині в десять разів менше?

2.3. Бішарова ліпідна мембрана (БЛМ) завтовшки 10 нм розділяє камеру на дві частини. Щільність потоку метиленового синього через БЛМ стала і дорівнює  $3 \cdot 10^{-4} \text{ М} \cdot \text{см/с}$ , причому концентрація його з одного боку цієї мембрани дорівнює  $10^{-2}$  М, а з іншого  $2 \cdot 10^{-3}$  М. Чому дорівнює коефіцієнт дифузії цієї речовини через БЛМ?

2.4. Визначте коефіцієнт дифузії в воді еритролу, якщо середнє зміщення його молекули складає 40 мкм.

2.5. Знайдіть коефіцієнт проникливості плазматичної мембрани *Mycoplasma* для формаміду, якщо при різниці концентрацій цієї речовини всередині й зовні мембрани, рівної  $0,5 \cdot 10^{-4}$  М, щільність потоку її через мембрану дорівнює  $8 \cdot 10^{-4} \text{ М} \cdot \text{см/с}$ .

2.6. Між внутрішньою частиною клітини і зовнішнім розчином існує різниця потенціалів (мембранний потенціал спокою) порядку  $U = 80$  мВ. Полагаючи, що електричне поле всередині мембрани однорідне, і рахуючи товщину мембрани  $l = 8$  нм, знайдіть напруженість цього поля.

2.7. Для дослідження структури і функції біологічних мембран використовують моделі – штучні фосфоліпідні мембрани, які складаються із бімолекулярного шару фосфоліпідів. Товщина штучної мембрани досягає близько  $l = 6$  нм. Знайдіть електроємність  $1 \text{ см}^2$  такої мембрани, рахуючи її відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r = 3$ . Порівняйте отриману електроємність з аналогічною характеристикою конденсатора, відстань між пластинами якого  $l = 1$  мм.

2.8. Потенціал спокою нервового волокна кальмара дорівнює  $-60$  мВ, а потенціал дії  $+35$  мВ. Внаслідок чого відбувається така зміна мембранного потенціалу?

2.9.. Яка із нижченаведених сполук має найменшу проникність через ліпідний бішар і чому: толуол, етанол, йони калію, кальцію? Наведіть необхідні рівняння.

2.10. Визначте рівноважний мембранний потенціал мітохондрій, якщо при  $37^\circ\text{C}$  всередині мітохондрій  $\text{pH} = 9$ , а в навколишньому середовищі  $7$ .

2.11. Визначте рівноважний мембранний потенціал на мембрані при співвідношенні концентрацій натрія ззовні і всередині клітини: а)  $1:1$ ; б)  $10:1$ ; в)  $100:1$ .

2.12. Як зміниться основне електродифузне рівняння при відсутності зовнішнього електричного поля?

2.13. В'язкість ліпідного бішару в  $100$  разів більша, ніж в'язкість води. Товщина примембранних шарів води приблизно в  $100$  разів більша товщини ліпідного бішару. Коефіцієнт розподілу кисню в системі ліпід-вода близький до  $1$ . Що є основним бар'єром для молекулярного кисню при його дифузії через мембрану: ліпідний бішар чи примембранний шар? Наведіть необхідні рівняння.

2.14. Визначте рівноважний мембранний потенціал, що створюється на бішаровій ліпідній мембрані йонами калія при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ , якщо концентрація калія з одного боку мембрани дорівнює  $10^{-3}\text{ M}$ , а з іншого –  $10^{-5}\text{ M}$ .

2.15. Який електричний заряд мембрани, якщо її ємність  $1\text{ мкФ} \cdot \text{см}^{-1}$ , а рівноважний мембранний потенціал такий же, як в попередній задачі?

2.16. Розрахуйте потенціал спокою гігантського аксону кальмара, якщо відомо, що концентрація йонів натрія ззовні дорівнює  $440\text{ мМ}$ , а всередині його  $49\text{ мМ}$  (температура дорівнює  $20^{\circ}\text{C}$ ).

2.17. Потенціал спокою нерва кінцівки краба дорівнює  $89\text{ мВ}$ . Чому дорівнює концентрація йонів калія всередині нерва, якщо ззовні вона складає  $12\text{ мМ}$ ? Прийняти температуру рівною  $20^{\circ}\text{C}$ .

2.18. Визначте час, протягом якого встановлюється рівноважна концентрація еритролу в клітині, якщо об'єм клітини  $70\text{ мкм}^3$ , коефіцієнт проникливості  $13\text{ мкм/с}$ , а площа поверхні мембрани клітини  $43\text{ мкм}^2$ .

2.19. В клітинах фагоцитів рівноважна концентрація речовини встановлюється за  $0,2\text{ с}$ . Чому дорівнює коефіцієнт проникливості цієї речовини через мембрану фагоцитів, якщо вважати клітину тілом сферичної форми діаметром  $8\text{ мкм}$ ?

2.20. Електрична напруга на мембрані дорівнює  $U = 60\text{ мВ}$ , товщина мембрани  $l = 10\text{ нм}$ . Знайдіть напруженість електричного поля в мембрані ( $E$ ) і порівняйте її з напруженістю електричного поля плоского конденсатора ( $E_K$ ) з напругою  $U_K = 220\text{ В}$ . Відстань між пластинами  $l_K = 0,1\text{ мм}$ .

2.21. Згідно з уявленнями Ейнтховена, серце подібне до електричного диполя. Електричний момент серця-диполя періодично змінюється як за модулем, так і за напрямком. Біопотенціали (електрокардіограми) реєструються між вершинами умовно рівнобічного трикутника, який утворюється двома руками й однією ногою. Який вигляд мали б електрокардіограми, зняті в трьох можливих відведеннях, якщо б електричний момент серця рівномірно обертався у фронтальній площині? Вкажіть загальні формули і побудуйте три

«електрокардіограми», відкладаючи по осі абсцисс час, а по осі ординат – різницю біопотенціалів.

2.22. На пластини плаского конденсатора, відстань між якими  $l = 3$  см, подано напругу  $U = 1$  кВ. Простір між пластинами заповнено кров'ю. Знайдіть поверхневу щільність зв'язаних зарядів і поляризованість.

2.23. Одна частина плаского конденсатора заповнена водою, інша – гліцерином. У скільки разів поверхнева щільність зв'язаних зарядів одного діелектрика більша, ніж іншого?

2.24. Обрахуйте електроємність тіла людини, вважаючи її рівною ємкості електропровідної кулі того ж об'єму. Середню щільність тіла прийняти рівною  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>; маса людини  $m = 60$  кг.

2.25. Плаский конденсатор, відстань між пластинами якого  $l = 0,5$  см, заряджений до різниці потенціалів  $U = 700$  В. Диелектрик – кров. Визначте об'ємну щільність енергії поля конденсатора.

2.26. Конденсатор ємкістю  $C_1 = 2$  мкФ заряджений до різниці потенціалів  $U = 100$  В. Після відключення від джерела ЕРС конденсатор був підключений до іншого незарядженого конденсатора ємкістю  $C_2 = 5$  мкФ. На скільки змінилася енергія системи двох конденсаторів?

2.27. Відстань між пластинами плаского повітряного конденсатора площею  $S = 50$  см<sup>2</sup> змінюється від  $l_1 = 3$  см до  $l_2 = 10$  см. Конденсатор був заряджений до напруги  $U = 200$  В і відключений від джерела струму. Знайдіть зміну енергії поля конденсатора. Чому дорівнює робота з розсування пластин конденсатора?

2.28. Використовуючи дані попередньої задачі і вважаючи конденсатор підключеним до джерела струму, знайдіть зміни енергії конденсатора, джерела струму і роботу з розсування пластин конденсатора.

2.29. Через плаский розтин провідника проходять електрони зі швидкістю  $v = 1,5$  см/с. Концентрація електронів дорівнює  $n = 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Знайдіть щільність струму. Визначте силу струму, створюваного цими зарядами, якщо розтин провідника  $S = 0,3$  мм<sup>2</sup>.



2.30. Знайдіть щільність струму в електроліті, якщо концентрація йонів в ньому  $n = 10^5 \text{ см}^{-3}$ , їх рухомості  $b_+ = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $b_- = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  і напруженість електричного поля  $E = 10 \text{ В/см}$ . Вважаючи щільність струму всюди однаковою, знайдіть силу струму, якщо площа кожного електроду  $S = 1 \text{ дм}^2$ . Прийняти заряд йону рівним заряду електрона.

2.31. Між двома електродами, до яких прикладена постійна напруга  $U = 36 \text{ В}$ , знаходиться жива тканина. Умовно можна вважати, що тканина складається з двох шарів сухої шкіри і м'язів з кровоносними судинами. Товщина кожного шару шкіри  $l_1 = 0,3 \text{ мм}$ , товщина внутрішньої тканини  $l_2 = 9,4 \text{ мм}$ . Знайдіть щільність струму і падіння напруги в шкірі та у м'язовій (судинній) тканині, розглядаючи їх як провідники. Як змінюється потенціал в напрямку, перпендикулярному цим шарам?

2.32. При сухій шкірі опір між долонями рук може досягати значення  $R_1 = 10^5 \text{ Ом}$ , а при вологих долонях цей опір суттєво менший ( $R_2 = 1000 \text{ Ом}$ ). Оцініть струм, який пройде через тіло людини при контакті з електромережею напругою  $U = 220 \text{ В}$ . Порівняйте цей струм із значенням порогів відчутного і невідпускаючого струмів, якщо частота струму дорівнює  $\nu = 50 \text{ Гц}$ .

### Завдання до теми

1. Наведіть параметри, від яких залежить щільність потоку дифундуючої речовини.
2. За якою формулою розраховується середня величина зміщення молекули речовини в розчині.
3. Що розраховується за формулою Нернста?
4. Визначте коефіцієнт проникливості мембрани для даної речовини.
5. Сформулюйте визначення поняття «коефіцієнт дифузії».

### Контрольні питання

1. Що таке рівноважний мембранний потенціал?
2. Які процеси за участю нуклеїнових кислот вам відомі?
3. Розрахуйте характерний час встановлення рівноважної концентрації?

**3 Література:** [1, 8, 9, 11].

### Практичне заняття № 3

#### Тема. Гемодинаміка. Течія рідини. Біореологія.

**Мета:** засвоїти біофізичні принципи процесу течії рідини, дати визначення навчальних елементів, набути навичок розв'язання задач за рівнянням Бернуллі.

**Навчальні елементи:** *ідеальна рідина, внутрішнє тертя між шарами рідини, закон Пуазейля.*

#### Короткі теоретичні відомості

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

$$P_{ст} + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = const,$$

де  $p_{ст}$  – статичний,  $\frac{\rho v^2}{2}$  – динамічний і  $\rho gh$  – гідростатичний тиск,  $\rho$  – густина (щільність) рідини,  $v$  – її швидкість,  $h$  – висота відповідної точки рідини відносно певного рівня (наприклад, рівня Землі).

*Сила внутрішнього тертя, що діє між шарами рідини площиною  $S$  (рівняння Ньютона),*

$$F_{тр} = \eta \frac{dv}{dx} S,$$

$\eta$  – в'язкість,  $\frac{dv}{dx}$  – градієнт швидкості.

*Об'єм рідини, який переноситься за  $t$  с через перетин циліндричної труби радіуса  $R$  (формула Пуазейля):*

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l},$$

*через мінливий перетин (переменное сечение)*

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta dl} dp,$$

де  $l$  – довжина ділянки труби, на кінцях якої підтримується різниця тисків ( $P_1 - P_2$ ).

*Гідравлічний опір:*

$$X = \frac{8\eta l}{\pi R^4}.$$

*Сила внутрішнього тертя, що діє на рухоме в рідині сферичне тіло (кульку) радіуса  $r$  (закон Стокса):*

$$F_{\text{тр}} = 6\pi r v \eta,$$

де  $v$  – швидкість кульки.

*Швидкість рівномірного падіння кульки у в'язкій рідині:*

$$v = \frac{2(\rho - \rho_p)r^2 g}{9\eta},$$

де  $\rho$  і  $\rho_p$  – густина матеріалу, з якого зроблена кулька, і рідини відповідно.

*Число Рейнольдса для труби діаметра  $D$ :*

$$Re = \frac{\rho_p V D}{\eta} = \frac{V D}{\nu},$$

де  $V$  – швидкість рідини,  $\nu = \eta/\rho_p$  – кінематична в'язкість. Для гладких циліндричних труб критичне число Рейнольдса приблизно дорівнює 2300.

*Додатковий тиск під сферичною поверхнею рідини:*

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r},$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини,  $r$  – радіус сферичної поверхні.

*Висота підняття (опускання) рідини в капілярі:*

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{R \rho_p g},$$

де  $\theta$  – крайовий кут,  $R$  – радіус капіляра,  $\rho_p$  – густина рідини.

*Закон Гука:*

$$\sigma = \varepsilon E,$$

де  $\sigma$  – механічна напруга,  $\varepsilon$  – відносна деформація,  $E$  – модуль пружності (модуль Юнга).

*Для в'язкого елемента*

$$\varepsilon \eta = \sigma t,$$

де  $\eta$  – в'язкість,  $t$  – час дії деформуючої сили.

При паралельному з'єднанні пружного і в'язкого елементів (модель Кельвіна–Фойгта)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-Et/\eta}).$$

Механічна напруга стінки кровоносної судини:

$$\sigma = pr/h,$$

де  $r$  – радіус просвіту судини,  $h$  – товщина стінки судини.

Швидкість розповсюдження пульсової хвилі у великих судинах:

$$V = \sqrt{\frac{Eh}{2\rho r}},$$

де  $\rho$  – густина крові.

Зв'язок об'ємної  $Q$  і лінійної  $V_{\text{кр}}$  швидкостей кровотоку в судині:

$$Q = V_{\text{кр}} S,$$

де  $S$  – площа просвіту судини.

Робота, яка здійснюється лівим шлуночком серця при кожному скороченні,

$$A = V_0(p + \rho v^2/2),$$

де  $p$  – середній тиск, під яким кров викидається в аорту;  $\rho$  – густина крові;  $V_0$  – ударний об'єм;  $v$  – швидкість руху крові.

### Задачі для розв'язання

3.1. Швидкість течії води в деякому перетині горизонтальної труби  $v = 5$  см/с. Найдіть швидкість течії в тій частині труби, яка має: а) вдвічі менший діаметр; б) вдвічі меншу площу поперечного перетину.

3.2. Спостерігаючи під мікроскопом рух еритроцитів в капілярі, можна виміряти швидкість течії крові ( $v_{\text{кр}} = 0,5$  мм/с). Середня швидкість току крові в аорті складає  $v_a = 40$  см/с. На основі цих даних визначте, у скільки разів сума поперечних перетинів всіх функціонуючих капілярів більша за перетин аорти.

3.3. Швидкість течії води в усіх перетинах нахиленої труби однакова. Найдіть різницю тисків  $\Delta p$  у двох точках, висоти яких над рівнем Землі

розрізняються на  $\Delta h = 0,5$  м. Чому дорівнює  $\Delta p$ , якщо система: а) знаходиться у стані невагомості; б) зазнає трикратне перенавантаження?

3.4. В широкій частині горизонтальної труби вода тече зі швидкістю  $v = 50$  см/с. Визначте швидкість течії води у вузькій частині труби, якщо різниця тисків у широкій і вузькій її частинах  $\Delta p = 1,33$  кПа.

3.5. Швидкість течії води в деякому перетині горизонтальної труби дорівнює 5 см/с. Знайдіть швидкість течії в тій частині труби, яка має вдвічі менший діаметр.

3.6. Визначте роботу, що здійснюється серцем при скороченні лівого шлуночка, якщо в аорту зі швидкістю 0,5 м/с викидається 60 мл крові проти тиску 13 кПа.

3.7. Знайдіть кінетичну енергію об'єму крові, що протікає за одну хвилину зі швидкістю 0,4 м/с через артерію діаметром 3 мм.

3.8. У скільки разів змінюється модуль пружності стінки аорти при атеросклерозі, якщо відомо, що швидкість пульсової хвилі зросла в три рази?

3.9. Знайдіть потужність, яку розвиває серце людини при скороченні тривалістю 0,3 с. Ударний об'єм крові дорівнює 60 мл, швидкість крові в аорті 0,5 м/с. Середній тиск, при якому кров виштовхується в аорту лівим шлуночком, дорівнює 13,3 кПа. Врахувати, що робота правого шлуночка складає 20% роботи лівого.

3.10. У скільки разів змінюється швидкість осідання еритроцитів у людей, хворих на сфероцитоз, в порівнянні з нормою, якщо середній радіус еритроцита при цьому захворюванні зростає у 1,5 рази?

3.11. Визначте відносне подовження скелетного м'язу, яка моделюється тілом Кельвіна-Фойгта, за 3 хв, якщо модуль пружності м'язу 1,2 МПа, площа поперечного перетину  $0,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>, а навантаження на м'яз 6,3 Н. В'язкість речовини м'язу прийняти рівною 1,25 г/(см • с).

3.12. Визначте ефективний модуль пружності кравецького м'язу жаби, якщо при зростанні прикладеної до м'язу напруги від 10 кПа до 40 кПа довжина його збільшувалася від 0,032 м до 0,034 м.

3.13. Розрахуйте відносне видовження скелетного м'язу, предполагаючи, що його механічні властивості можна описати моделлю чисто в'язкісного елемента. Умови взяті із позапопередньої задачі.

3.14. Як зміниться модуль пружності стегнової кістки людини, якщо при напруженні 5 Па відносна деформація складає 0,025, а при збільшенні напруги до 11 Па вона стала рівною 0,055?

3.15. Визначте тиск у стінці капіляра діаметром 20 мкм, якщо товщина стінки судини 2 мкм, а тангенціальне напруження в стінці  $8 \cdot 10^{-5}$  Па.

3.16. Який гідравлічний опір кровоносної судини завдовжки 0,12 м радіусом 0,1 мм?

3.17. Чому дорівнює ефективний модуль пружності стінки грудної аорти, якщо відношення радіуса просвіту судини до товщини його стінки дорівнює 5? Відомо, що при зміні тиску всередині аорти від 13,3 до 16 кПа площа поперечного перетину судини збільшується з 6,16 до 6,2 см<sup>2</sup>.

3.18. Швидкість пульсової хвилі в артеріях складає 8 м/с. Чому дорівнює модуль пружності цих судин, якщо відомо, що відношення радіуса просвіту до товщини стінки судини дорівнює 6, а густина крові дорівнює 1,15 г/см<sup>3</sup>?

3.19. Знайдіть об'ємну швидкість кровотоку в аорті, якщо радіус просвіту аорти дорівнює 1,75 см, а лінійна швидкість крові в ній складає 0,5 м/с.

3.20. На скільки відсотків зміниться частота ультразвуку при відбитті його від еритроцитів, що рухаються в артерії? Середню швидкість руху еритроцитів прийняти рівною 40 см/с.

3.21. Визначте межу міцності кістки діаметром 30 мм і завтовшки 3 мм, якщо для її руйнування потрібна сила 400 кН.

3.22. Щоденно із споживаною їжею робітник фізичної праці отримує близько 17 МДж. Протягом дня він виконує роботу 10 МДж. Яка доля енергії, що надходить з їжею, перетворюється на корисну роботу?

3.23. За деякими оцінками пловець на дистанції витрачає 240 кДж енергії за хвилину. При цьому тільки чверть цієї енергії іде на механічну роботу його

рук і ніг. Чому дорівнює середня сила, що перешкоджає переміщенню пловця, якщо за одну хвилину він пропливає 100 м?

3.24. Скільки корисної роботи може бути отримано при спалюванні 1 моль глюкози, якщо вважати, що тіло людини працює як теплова машина? ( $\eta = 30\%$ )

3.25. Дієта людини масою 70 кг містить 400 г білка (20,1 МДж/кг), 22 г жирів (39,8 МДж/кг) і 80 г вуглеводів (16,7 МДж/кг). Кожен день він підіймається на висоту 3 км і здійснює перед цим роботу, включаючи роботу метаболізму, що в чотири рази перевищує механічну роботу підняття свого тіла на висоту 3 км. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії при такому щоденному процесі?

3.26. Визначте температуру м'язу, вважаючи, що він працює як теплова машина з  $\eta = 30\%$  при температурі 25 °С.

#### **Завдання до теми**

1. Опишіть зв'язок між швидкістю течії  $v$ , тиском  $p$  та висотою  $h$  певної точки в ідеальній рідині.
2. За яким рівнянням обраховується об'єм рідини, який переноситься за 1 с через перетин циліндричної труби визначеного радіуса?
3. Обрахуйте механічну напругу стінки кровоносної судини.

#### **Контрольні питання**

1. Яка робота здійснюється лівим шлуночком серця при кожному скороченні?
2. Що таке модель Кельвіна–Фойгта?
3. Який зв'язок об'ємної  $Q$  і лінійної  $V_{кр}$  швидкостей кровотоку в судині?

**Література:** [1, 8, 9, 11].

### **Практичне заняття №4**

**Тема.** Дія електричного поля на біооб'єкти.

**Мета:** засвоїти принципи дії електричного поля, навчитися розраховувати дію електричного поля на біооб'єкти, дати визначення навчальних елементів.

**Навчальні елементи:** *електричне поле, діелектрична проникливість, дисперсія, кількість тепла, УВЧ-терапія.*

### **Короткі теоретичні відомості**

#### Електричне поле

Органічні речовини (білки, жири, вуглеводи), з яких складаються живі тканини, в чистому і сухому вигляді є діелектриками. Однак всі тканини й клітини в організмі містять або омиваються рідинами (кров, лімфа, різні тканинні рідини), до складу яких, крім органічних коллоїдів, входять розчини електролітів. Тому ці рідини є відносно добрими провідниками.

Різні тканини організму мають різну електропровідність:

спинно-мозкова рідина –  $1,8 - 1,4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

кров (мязи) –  $0,5 - 0,6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

кісткова тканина (без окістя) –  $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

жирова тканина –  $0,03 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Біологічні об'єкти являють собою гетерогенні структури. Гетерогенність тканин в більшій ступені обумовлена наявністю мембран. До них відносяться клітинні поверхневі мембрани і мембрани, що оточують клітинні органоїди й ті, що утворюють ендоплазматичну сітку.

Під дією електричного поля в діелектриках відбувається змещення і орієнтація зарядів в межах атома чи молекули. Це явище має назву поляризація діелектрика. Час, протягом якого відбувається утворення та (або) орієнтація електричних диполей вздовж силових ліній електричного поля, називається часом релаксації поляризації. Усі види поляризації діелектриків: електронна, йонна, орієнтаційна, макроструктурна, поверхнева та ін. в тій чи іншій мірі притаманні біологічним об'єктам.

Макроструктурна поляризація відбувається в усьому об'ємі клітин внаслідок неоднорідності електричних властивостей клітин. Під дією зовнішнього електричного поля всередині окремих структурних елементів клітин, обмежених мембранами, відбувається переміщення вільних зарядів-йонів, внаслідок чого ця структурна одиниця перетворюється на



макроскопічний електричний (такий, що містить багато атомів і молекул) диполь.

Поверхнева поляризація відбувається на поверхневих, таких, що мають подвійний електричний шар (наприклад, мембрани). При накладанні зовнішнього електричного поля на поверхнях розділу відбувається перерозподіл йонів і частинок дисперсної фази заряджених протилежно.

Часи релаксації:

електронної поляризації –  $10^{-16} - 10^{-14}$  с

йонної поляризації –  $10^{-14} - 10^{-12}$  с

орієнтаційної поляризації –  $10^{-13} - 10^{-7}$  с

макроструктурної поляризації –  $10^{-8} - 10^{-3}$  с

поверхневої поляризації –  $10^{-3} - 10^0$  с

В тканинах, поміщених у перемінне електричне поле, спостерігається поляризація, час релаксації якої менше половини періода зміни поля. Тому зі зростанням частоти більш повільні види поляризації "випадають". Цим пояснюється зменшення діелектричної проникливості зі зростанням частоти (дисперсія діелектричної проникливості).

При дослідженні частотних залежностей діелектричної проникливості біологічних об'єктів було знайдено три області дисперсії, які отримали назви  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -дисперсії (за Г. Шваном).

$\alpha$ -дисперсія займає область низьких частот, приблизно до 1000 Гц. В даній області зменшення діелектричної проникливості біологічних систем обумовлено тільки зменшенням ефекта поляризації поверхні клітин.

$\beta$ -дисперсія займає більш широку область частот:  $10^3 - 10^7$  Гц. В цій області зменшення діелектричної проникливості пов'язано зі зменшенням макроструктурної поляризації.

$\gamma$ -дисперсія спостерігається в області вище 1000 МГц (вище  $10^9$  Гц).

Зменшення діелектричної проникливості в цьому діапазоні обумовлено послабленням ефекту орієнтаційної поляризації, який викликається диполями води. Величина  $\gamma$ -дисперсії буде залежати від вмісту вільної води у

досліджуваних тканинах. В області вище  $10^{10}$  Гц ефект поляризації, обумовлений диполями води, відсутній. Диелектрична проникливість буде міти невеликі значення, які визначаються тільки йонною та електронною поляризацією, яка має найменший час релаксації.

Електричні коливання поділяються за частотами на кілька діапазонів, використовуваних у лікарських методах

низької частоти – до 20 Гц

звукової частоти – 20 Гц – 20 кГц

ультразвукової частоти (УЗ) – (20 – 200) кГц

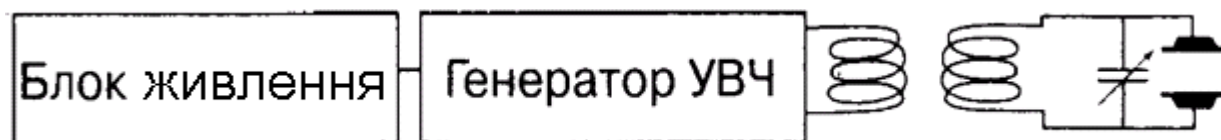
високої частоти (ВЧ) – (0,2 – 30) МГц

ультрависокої частоти (УВЧ) – (30 – 300) МГц

надвисокої частоти (СВЧ) – вище 300 МГц

Терапія електричним полем УВЧ проводиться на частотах (30 – 50) МГц. При цьому методі відповідна область тіла пацієнта піддається дії ультрависокочастотного електричного поля. Процедура проводиться за допомогою апарата УВЧ-терапії.

Блок-схема апарата УВЧ-терапії



В апаратах УВЧ вплив на хворого здійснюється за допомогою додаткового коливального контура, до якого підключаються електроди, що накладаються на тіло хворого. Цей контур називається терапевтичним (ТК). В генераторі УВЧ є відносно висока постійна напруга, необхідна для роботи радіоламп та небезпечна для людини. Щоб хворий ні за яких обставин не міг піддатися дії цієї напруги, ТК зв'язується з контуром генератора УВЧ індуктивно. ТК має підлаштувальний конденсатор перемінної ємності, за допомогою якого відбувається налаштування контура в резонанс з генератором УВЧ. При резонансі в ТК виникають коливання найбільшої потужності й УВЧ-електричне поле викликає в тканинах найбільший ефект.

У розчинах електролітів УВЧ-електричне поле викликає струм провідності, що супроводжується виділенням тепла:

$$Q = K_2 \sigma E_{\text{ef}}^2 V t$$

де  $Q$  – кількість тепла, що виділяється в об'ємі  $V$  за час  $t$  в тканинах, які мають електропровідність  $\sigma$ ;  $E_{\text{ef}}$  – ефективне значення напруженості електричного поля.

Коефіцієнти  $K_2$ , а далі  $K_1$ ,  $K_3$  залежать від вибору системи одиниць виміру, ступеню неоднорідності поля, розмірів електродів та їх розташування. В діелектриках під дією електричного поля відбувається поляризація. Обертально-коливальні рухи поляризованих молекул, викликані перемінним УВЧ-полем, супроводжується втратами енергії, яка витрачається на подолання сил зв'язку між молекулами, що утримують молекули в рівноважному положенні. Ці втрати, які називаються діелектричними, залежать від природи діелектрика і характеризуються тангенсом кута втрат ( $\text{tg } \sigma$ ). Кут втрат пов'язаний з відставанням по фазі коливань молекул від коливань напруженості електричного поля.  $\text{tg } \sigma$  відчуває різкі зміни в областях  $\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -дисперсії. Кількість тепла, що виділяється в об'ємі  $V$  діелектрика за час  $t$  внаслідок діелектричних втрат, визначається рівнянням:

$$Q = K_3 \varepsilon \varepsilon_0 \nu E_{\text{ef}}^2 \text{tg } \sigma V t$$

$\varepsilon_0$  – електрична стала,

$\varepsilon$  – діелектрична проникливість,

$\nu$  – частота зміни знака поля.

Високочастотне магнітне поле викликає у тканинах вихрові електричні струми, енергія яких переходить в тепло. Вихрові струми утворюються переважно у струмопровідних тканинах, які містять розчини електролітів.

Кількість тепла  $Q$ , що виділяється в об'ємі розчину  $V$  за час  $t$ , виражається формулою:

$$Q = K_1 \sigma \omega B_{\text{ef}}^2 V t$$

$\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота,

$B_{\text{ef}}$  – ефективне значення магнітної індукції.

Вплив змінним магнітним полем ВЧ на тканини організма при індуктотермії проводиться на частоті 13,56 МГц.

Вплив на тканини організма з лікарською метою електромагнітними хвилями в сантиметровому діапазоні називається мікрохвильовою терапією (МВ-терапія). Частоти 460 МГц ( $\lambda = 65$  см) и 2375 МГц ( $\lambda = 12,6$  см). Вплив здійснюється шляхом опромінення поверхні відповідної області тіла спрямованим потоком хвиль, який утворюється за допомогою спеціального випромінювача, який називається хвильоводом.

Сантиметрові хвилі поглинаються переважно в поверхневих шарах тканин організма (глибина проникнення декілька сантиметрів). Первинна дія їх обумовлена коливаннями (осциляцією) йонів в розчинах електролітів, а також полярних молекул в діелектрику, які викликаються електричною складавою поля хвилі, проникаючої у тканини. При цьому виділяється теплота. В цьому відношенні дія мікрохвиль подібна до дії електричного поля УВЧ. Однак при коливаннях СВЧ, які використовуються в цьому методі, переважне значення має поведінка молекул води, які приймають участь в орієнтаційних коливаннях. Тому найбільше поглинання енергії хвилі і, відповідно, виділення теплоти відбувається у водовмісних тканинах, наприклад, м'язовій тканині й крові, найменше – в жировій тканині в підшкірній клітковині. Цим МВ-терапія відрізняється від терапії електричним полем УВЧ.

### **Задачі для розв'язання**

4.1. Яку ємність повинен мати ТК апаратів для УВЧ-терапії та для індуктотермії, якщо їх резонансні частоти та індуктивності дорівнюють відповідно:  $V_1 = 40,68$  МГц,  $V_2 = 13,5$  МГц;  $L_1 = 0,3$  мкГн,  $L_2 = 5$  мкГн?

Ємність ТК апаратів УВЧ-терапії та індуктотермії розраховувати за формулою Томпсона:  $T = 2\pi \sqrt{LC}$ ;  $T = 1/\nu$

4.2. Визначити кількість тепла, що виділяється в  $1 \text{ см}^3$  м'язової ( $Q_M$ ) та жирової ( $Q_J$ ) тканини відповідно за рахунок струму провідності при УВЧ-терапії за час процедури 10 хв. Напруженість електричного поля між електродами терапевтичного контура  $E_{\text{эф}} = 194$  В/м. Вважати поле у

досліджуваному об'ємі однорідним; взяти при розрахунках значення коефіцієнта  $K_2$  рівним одиниці.

$$\text{Для м'язової тканини } Q_M = 0,690 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$$

$$\text{Для жирової тканини } Q_{Ж} = 0,035 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$$

Кількість тепла, що виділяється в  $1 \text{ см}^3$  м'язової та жирової тканини за рахунок струму провідності,  $Q = \sigma E_{\text{эф}}^2 Vt$

4.3. Визначити відносну кількість тепла, яка виділяється у м'язовій тканині в порівнянні з жировою при мікрохвильовій терапії ( $\nu = 2,45 \cdot 10^9$  Гц).

$$E_{Ж} = 5,5; E_M = 47$$

$$\text{tg } \sigma_{Ж} = 0,21; \text{tg } \sigma_M = 0,34.$$

4.4. Вивести формулу для обрахування питомої теплової потужності в провіднику, який розміщений в перемінному електричному полі. Розглянути наступну модель: електричне поле створюється двома пластинами площі  $S$ , підключеними до полюсів високочастотного генератора з діючою напругою  $U$  і круговою частотою  $\omega$ . Відстань між пластинами  $l \ll$  розмірів пластин. Між пластинами розміщений провідник с питомим опором  $\rho$  товщиною  $h$ , форма і розміри якого співпадають з формою і розмірами пластин. Провідник розташований симетрично пластинам.

4.5. Визначити, по якій формулі слід вираховувати питому теплову потужність струму провідності, що виділяється в м'язовій тканині при УВЧ-прогріванні м'язової тканини. Використовувати результати попередньої задачі з наступними значеннями:  $\nu = 40$  МГц,  $l = 15$  см,  $h = 10$  см,  $\rho = 1,5$  Ом-м.

4.6. Отримати формулу для розрахунку питомої теплової потужності, що виділяється в діелектрику, якщо в задачі 4.4. замінити провідну пластину на діелектричну з проникливістю  $\epsilon$ .

4.7. Яку ємність повинен мати терапевтичний контур апаратів для УВЧ-терапії та індуктотермії, якщо їх резонансні частоти та індуктивності дорівнюють відповідно:  $\nu_1 = 40$  МГц,  $\nu_2 = 13,5$  МГц,  $L_1 = 0,3$  мкГн,  $L_2 = 5$  мкГн.

4.8. В мікрохвильовій терапії використовуються електромагнітні хвилі в дециметровому діапазоні  $\lambda_1 = 65$  см і сантиметровому діапазоні  $\lambda_2 = 12,6$  см. Визначити відповідні частоти.

4.9. Терапевтичний контур апарата УВЧ, що працює на частоті 40,68 МГц, складається з катушки індуктивності 0,17 мкГн і конденсатора перемінної ємності  $C_{\pi} = 10 - 80$  пФ, зашунтованого конденсатором  $C_0 = 48$  пФ. При якій ємності перемінного конденсатора терапевтичний контур буде налаштований в резонанс з анодним контуром?

### **Завдання до теми**

1. Які фізичні прилади вимірюють електричні та магнітні поля тіла людини?
2. За яким рівнянням обраховується кількість тепла, що виникає внаслідок виникнення струму провідності у розчинах електролітів під дією УВЧ-електричного поля?
3. Зобразьте блок-схему апарата УВЧ-терапії.

### **Контрольні питання**

1. Які види і джерела фізичних полей тіла людини?
2. Як вимірюють електромагнітне випромінювання тіла людини в СВЧ-діапазоні?
3. Наведіть приклади застосування метода СВЧ-радіометрії в фізіології та медицині.
4. Що таке УВЧ-терапія? На якому фізичному принципі базується цей метод?

**Література:** [1, 8, 9, 11].

## 2. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

### Розподіл балів, які отримують студенти

Вид занять	Змістовий модуль № 1	Змістовий модуль № 2	Сума
1	2	3	4
Лекції:	14 год.	14 год.	10 балів, з них:
– контроль відвідування лекцій	2,5	2,5	5
– ведення конспекту лекцій, (питань, що винесені на самостійне опрацювання)	2,5	2,5	5
Практичні заняття:	4 год.	4 год.	20 балів, з них:
– контроль відвідування, підготовка до заняття	5	5	10
– виконання завдання, конспект практичного заняття	5	5	10
Поточний та підсумковий контроль:	Змістовий модуль № 1	Змістовий модуль № 2	50 балів, з них:
– виконання контрольних робіт (максимальний бал)	15	15	30
– опитування, виконання завдань самостійної роботи (максимальний бал)		10	10
– реферати, наукові статті, тези (максимальний бал)		10	10
Залік		20	20 балів
Усього			100 балів

### Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
1	2	3	4
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D		
60-63	E	задовільно	
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### Основна література

1. Артюхов В.Т., Ковалева Т.А., Шмелев В.П. Биофизика. Воронеж., 1994.
2. Волькенштейн М.В. Биофизика. М., Наука, 1981.
3. Волькенштейн М.В. Физика и биология. М., Наука, 1980.
4. Медицинская биофизика./ Под ред. В.О. Самойлова. Л., 1986.
5. Рубин А.Б. Биофизика: в 2 т. М., Книжный дом «Университет», 2000.
6. Биофизика. / Под ред. Б.Н. Тарусова и О.Р., Кольс. М., 1968.
7. Владимиров Ю.А., Рощупкин Д.И., Потаняню А.Я., Деев А.И. Биофизика. М., 1983.
8. Волькенштейн М.В. Биофизика. М., 1988.

### Додаткова література

1. Блюменфельд Л.А. Проблемы биологической физики. М., 1977.
2. Шульц Г., Ширмер Р. Принципы структурной организации белков. М., Мир, 1982.
3. Фершт Э. Структура и механизм действия ферментов. М., Мир, 1980.
4. Геннис Р. Биомембраны. Молекулярная структура и функция. М., Мир, 1997.
5. Ходжкин А. Нервный импульс. М., Наука, 1965.
6. Кольс О.Р., Максимов Г.В. Раденович Ч.Н. Биофизика ритмического возбуждения. М., МГУ, 1993.
7. Бэгшоу Л. Мышечное сокращение. М., 1985.
8. Устинов Г.Г., Поляков В.В. Медицинская физика. Физические процессы в организме человека. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2001.
9. Клейтон Р. Фотосинтез. Физические механизмы и химические модели. М., 1984.
10. Хилл А. Механика мышечного сокращения. М., 1985.
11. Устинов Г.Г., Поляков В.В. Медицинская физика. Физические методы и приборы в диагностике и лечении. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002.
12. Коган А.Б. Электрофизиология. М., 1969
13. Ємчик Л.Ф., Кміт Я.М. «Медична та біологічна фізика», Л. «Світ», 2003
14. Шевченко А.Ф. «Основи біологічної фізики», К, «Медицина», 2008

### Електронні ресурси

Волькенштейн М.В. Биофизика. М., Наука 1988.djv.

[http://ihtik.lib.ru/dreamhost\\_chem\\_8janv2007.html](http://ihtik.lib.ru/dreamhost_chem_8janv2007.html)

Волькенштейн М.В. Молекулярная биофизика. М., Наука 1975.djv.

[http://ihtik.lib.ru/dreamhost\\_chem\\_8janv2007.html](http://ihtik.lib.ru/dreamhost_chem_8janv2007.html)

Волькенштейн М.В. Общая биофизика. М., Наука 1978.djv.

[http://ihtik.lib.ru/dreamhost\\_chem\\_8janv2007.html](http://ihtik.lib.ru/dreamhost_chem_8janv2007.html)

Ревин В.В., Максимов Г.В., Кольс О.Р. Биофизика.djvu.



[http://ihtik.lib.ru/servage\\_med\\_29oct2006n.html](http://ihtik.lib.ru/servage_med_29oct2006n.html)

Антонов В.Ф., Черныш А.М., Пасечник В.И., Вознесенский С.А., Козлова Е.К.  
Биофизика.djvu.

[http://ihtik.lib.ru/servage\\_med\\_29oct2006n.html](http://ihtik.lib.ru/servage_med_29oct2006n.html)

Романовский Ю.М., и др. - Математическая биофизика (Наука, 1984).djvu.

[http://ihtik.lib.ru/dreamhost\\_biology\\_4janv2007.html](http://ihtik.lib.ru/dreamhost_biology_4janv2007.html)

Рубин - Биофизика в 2х томах.rar.

[http://ihtik.lib.ru/dreamhost\\_biology\\_4janv2007.html](http://ihtik.lib.ru/dreamhost_biology_4janv2007.html)

Ю. А. Владимиров, Д. И. Рощупкин, А. Я. Потапенко, А. И. Деев. Биофизика.  
М., 1983 г..djvu.

[http://ihtik.lib.ru/servage\\_med\\_29oct2006n.html](http://ihtik.lib.ru/servage_med_29oct2006n.html)

А.Д.Базыкин - Математическая биофизика взаимодействующих популяций.

[http://ihtik.lib.ru/teor-estesty\\_21dec2006/](http://ihtik.lib.ru/teor-estesty_21dec2006/)

Губанов Н.И, Утепбергенов А.А. - Медицинская биофизика (1978).djvu.

[http://ihtik.lib.ru/servage\\_med\\_29oct2006n.html](http://ihtik.lib.ru/servage_med_29oct2006n.html)

Методичні вказівки щодо практичних занять з навчальної дисципліни «Біофізика» для студентів денної та заочної форм навчання за напрямом 6.040106 – «Біотехнологія»

Укладач: ст. викл. С.В. Дігтяр,

Відповідальний за випуск в.о. зав. кафедри біотехнології та здоров'я людини доц. О.В. Новохатько

Підп. до др. 25.07.2009 р. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. 1,8. Наклад 25 прим. Зам. № \_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Видавничий відділ КрНУ імені Михайла Остроградського  
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20