



Дідич В.М., Назаренко Н.С.

Фізичні основи звукових та ультразвукових методів дослідження в медицині



**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені М.І.ПИРОГОВА**

КАФЕДРА БІОФІЗИКИ, МЕДИЧНОЇ АПАРАТУРИ ТА ІНФОРМАТИКИ

**Фізичні основи
звукових та ультразвукових методів
дослідження в медицині**

Навчальний посібник
для студентів 1 курсу
медичного і фармацевтичного факультетів

Вінниця, ВНМУ – 2024

УДК 577.35:612.13
ББК 28.707.1+28.706 Я73
К 90

Навчальний посібник «Фізичні основи звукових та ультразвукових методів дослідження в медицині» для студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів затверджено Вченою радою ВНМУ ім. М.І.Пирогова.
Протокол №6 від 30 січня 2025р.

Рецензенти: д.м.н., професор **Очередько О.М.**
д.т.н., професор **Семенов А.О.**
д.т.н., професор **Павлов С. В.**

Фізичні основи звукових та ультразвукових методів дослідження в медицині / Дідич В.М., Назаренко Н.С. - Вінниця, ВНМУ, 2024. – 101с.

В навчальному посібнику викладені: основи звукових та ультразвукових методів дослідження в медицині (теоретичні відомості, формули та рівняння з фізичних і фізіологічних процесів в біологічному середовищі); контрольні запитання; тести для вивчення та засвоєння основних тем даного розділу, самоконтролю та самостійної роботи; приклади розв’язання практичних задач; задачі для самостійного розв’язування; опис двох лабораторних робіт. Навчальний посібник розраховано на студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів

УДК 577.35:612.13
ББК 28.707.1+28.706 Я73
Дідич В.М., Назаренко Н.С.

ЗМІСТ

• Вступ.....	6
• Тема:Звук. Фізичні та слухові характеристики. Звукові вимірювання. Фізичні основи звукових методів дослідження у клініці.....	8
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	27
• Тема: Зняття спектральної характеристики вуха на порозі чутності.....	30
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	45
<i>Лабораторна робота №22. Зняття спектральної характеристики вуха на порозі чутності</i>	48
• Тема: Вивчення методу імпульсної ультразвукової ехолокації	52
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	69
<i>Лабораторна робота №23. Вивчення методу імпульсної ультразвукової ехолокації</i>	72
• Тема: Вивчення елементів біофізики слуху	76
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	97

Вступ

Біофізика — наука про фізичні та фізико-хімічні явища, що відбуваються в живих організмах, тканинах, клітинах, а також їх дія на організм. Крім того, в лікувальній практиці використовується різноманітна апаратура — діагностична, терапевтична, хірургічна тощо, дія якої ґрунтується на фізичних явищах і процесах. Тому сьогоденній медичний працівник повинен добре розуміти біофізичні процеси, що протікають в організмі людини, а також знати можливості фізичної та, зокрема, електронної апаратури, з якою він неминуче буде працювати. Важливим етапом в вивченні положень біофізики є отримання навиків розв'язання практичних задач, засвоєння методології підходів для знаходження правильних шляхів, пошуку вірних рішень. Вирішенню цих завдань і присвячені теми даного навчального посібника.

Слуховий апарат людини постійно сприймає, аналізує та інтерпретує звукову інформацію про себе та про навколишнє середовище. Звуки відрізняються один від одного багатьма параметрами, поширюються у різноманітних середовищах. При цьому звукові хвилі зазнають змін, які відбуваються за законами акустики. Застосовуючи ці знання, людина зможе правильно аналізувати звуки і адекватно на них реагувати. Отже, звук є джерелом інформації. За допомогою клінічних методів дослідження (аускультация, перкусія, фонокардіографія, аудіометрія та ін.) лікар виявляє процеси (нормальні чи патологічні), що протікають в організмі людини.

За даними ВООЗ, більше 70% діагнозів у медицині встановлюється за допомогою так званих променевих методів дослідження (ультразвук, рентгенівське випромінювання, іонізуюче випромінювання, теплове випромінювання). Серед усіх променевих методів дослідження ультразвук займає особливе місце. За сукупністю позитивних характеристик з ультразвуковим дослідженням важко порівняти який-небудь інший метод, оскільки, жоден не має такого поєднання переваг:

- УЗІ дає достовірну інформацію про положення, форму і розміри внутрішніх органів.
- Дослідження зручне, загальнодоступне і не вимагає складної підготовки.
- Ультразвук практично нешкідливий і безпечний для лікаря і пацієнта.

- Дослідження безболісне і не пов'язане з неприємними відчуттями.
- Невеликі витрати часу на проведення дослідження.
- УЗ-дослідження проводиться в режимі реального часу.

Метод ультразвукової ехолокації, який застосовують у невропатології та нейрохірургії, має назву – *ехоенцефалографія*. Він дає можливість раннього вияву внутрішньочерепних крововиливів, абсцесів, рецидивів пухлинних захворювань мозку та інших. Ехоенцефалографія дає можливість контролювати результати внутрічерепних операцій, діагностувати такі грізні післяопераційні ускладнення як внутрічерепна гематома, набряк мозку та ін.

За допомогою ультразвукової ехотомографії можливо отримати достовірну інформацію про положення, форму і розміри внутрішніх органів, спостерігати їх роботу в динаміці. Медичні доплерівські прилади, засновані на ефекті Доплера, мають більші можливості і займають важливе місце в ультразвуковій діагностиці. Вони дозволяють вивчати динаміку ряду фізіологічних процесів в організмі, оцінювати швидкості і напрямки течії крові, рух кардіоструктур і стінок кровоносних судин.

Крім діагностики, ультразвук дуже широко використовується в інших сферах медицини: терапія, хірургія, нейрохірургія, педіатрія, фармація, стоматологія, онкологія і т.д. У зв'язку з цим існує гостра потреба в повноцінній підготовці медичного персоналу по одному із розділів медичної і біологічної фізики - «Фізичні основи звукових та ультразвукових методів дослідження в медицині». Це дозволить максимально ефективно використовувати сучасні медичні знання та апаратуру і якнайкраще допомагати людям.

В навчальному посібнику містяться матеріали до чотирьох тем, в яких крім теоретичних відомостей, містяться: контрольні запитання; тести для самоконтролю та самостійної роботи; приклади розв'язання практичних задач; задачі для самостійного розв'язування; опис двох лабораторних робіт - це допомагає студентам глибше засвоїти матеріал кожної теми, набути навиків роботи з ехоенцефалоскопом, ехотомоскопом і портативним ультразвуковим приладом «Мінідоп». Навчальний посібник розраховано на студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів.

Тема: ЗВУК. ФІЗИЧНІ ТА СЛУХОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЗВУКОВІ ВИМІРЮВАННЯ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У КЛІНІЦІ.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Звук для живих істот є джерелом інформації. Слуховий апарат людини постійно сприймає, аналізує та інтерпретує звукову інформацію про себе та про навколишнє середовище. Звуки відрізняються один від одного багатьма параметрами, поширюються у різноманітних середовищах. При цьому звукові хвилі зазнають змін, які відбуваються за законами акустики. Застосовуючи ці знання, людина зможе правильно аналізувати звуки і адекватно на них реагувати.

Для лікарів вчення про звук має значний інтерес у зв'язку з широкою областю його використання у медичній практиці. Добре відомо, що звукові сигнали можуть бути важливим джерелом інформації про стан внутрішніх органів (наприклад, шуми дихання, серцевої діяльності та ін.). Достатньо згадати такі традиційні акустичні методи діагностики, як аускультация та перкусія. Для діагностики серцевої діяльності поряд з електрокардіографією широко використовується фонокардіографія – реєстрація тонів та шумів серця з їх подальшим аналізом. Для оцінки гостроти слуху пацієнта використовують клінічний метод дослідження – аудіометрію.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- фізичні та слухові характеристики звуку;
- основні поняття: поріг чутності, поріг больового відчуття, область чутності, область мови;
- закон Вебера-Фехнера;
- суть та інформативність звукових методів дослідження у клініці.

Вміти:

- обчислювати характеристики механічних хвиль;
- визначати рівень гучності звуку певної інтенсивності і частоти;

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Поняття механічного коливання і хвилі. Поздовжні та поперечні хвилі.
Інфразвук, звук, ультразвук. Види звуків: тон (простий, складний) та шум.
2. Фізичні (об'єктивні) характеристики звуку.
3. Особливості поширення звуку у газоподібному, рідкому та твердому середовищах (швидкість поширення, коефіцієнт пропускання).
4. Слухові (суб'єктивні) характеристики звуку. Їх зв'язок з фізичними характеристиками звуку.
5. Поріг чутності, поріг больового відчуття, область чутності.
6. Рівень інтенсивності. Закон Вебера-Фехнера. Шкали рівнів інтенсивності та рівнів гучності. Криві рівної гучності.
7. Фізичні основи звукових методів досліджень у клініці: аускультация, перкусія, фонокардіографія, аудіометрія.

3.2. Зміст теми

- 1. Поняття механічного коливання і хвилі. Поздовжні та поперечні хвилі. Інфразвук, звук, ультразвук. Види звуків: тон (простий, складний) та шум.**

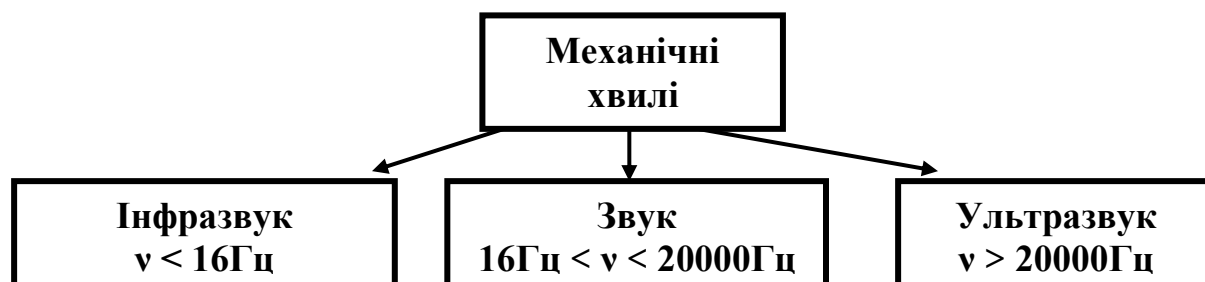
Якщо механічна коливальна система знаходиться у пружному середовищі, то вона приводить у коливальний рух частинки цього середовища. Процес поширення коливань у пружному середовищі називають **механічною хвилею**.

При розповсюдженні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а тільки коливаються біля своїх положень рівноваги. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передаються лише стан коливального руху та його енергія. Тому **основною властивістю** хвиль є перенесення енергії без перенесення речовини.

В залежності від виникаючих при коливальному русі деформацій відрізняють **поперечні** і **поздовжні** механічні хвилі. В поздовжній хвилі частинки середовища коливаються в напрямку розповсюдження хвилі, а в поперечних – здійснюють коливання в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі.

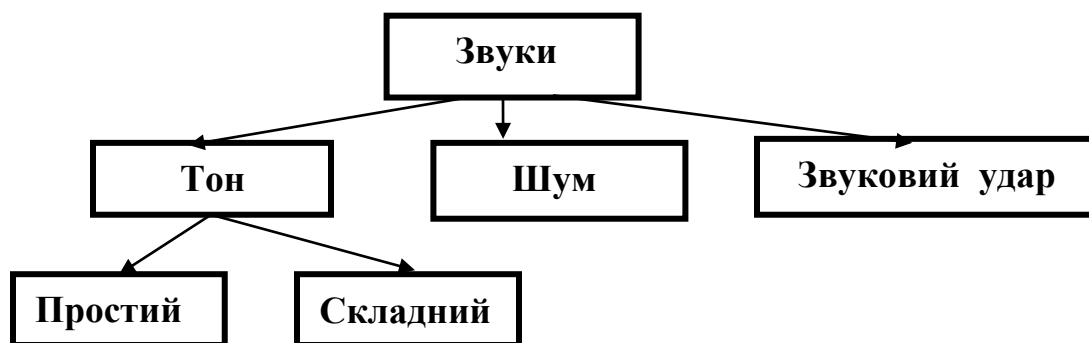
Акустика – це наука, яка досліджує механічні хвилі від низьких частот до 10^{13} Гц.

Механічні хвилі в залежності від частоти поділяються на три групи: інфразвук, звук, ультразвук.



Звук – це механічні хвилі з частотою від 16 до 20000 Гц.

Розглянемо види звуків:



Тон або музикальний звук – це звук, який є періодичним процесом, тобто закономірно змінюється з часом.

Простий тон – це звук, який є періодичним гармонічним процесом, тобто синусоїдальною звуковою хвилею, *наприклад, прості тони отримують за допомогою камертона або звукового генератора.*

Складні тони – це звуки, які є періодичними негармонічними процесами. Їх можна отримати, наприклад, за допомогою музичних інструментів, апарату мови людини тощо. Будь-який складний тон може бути розкладений на прості, які входять до його складу.

Шуми – це звуки, які є неперіодичними процесами, тобто їх частота і амплітуда змінюються хаотично. Спектр шуму – неперервний (суцільний).

Звуковий удар – це короткочасна звукова дія (хлопок, вибух), що має неперервний спектр.

Примітка: тональний звук – приємний для слуху; шум – шкідливий.

2. Фізичні (об'єктивні) характеристики звуку.

Фізичні характеристики звуку можуть бути оцінені відповідними приладами незалежно від людини, тому вони і називаються об'єктивними.

Розрізняють такі фізичні характеристики звуку:

- **Амплітуда (A)** – це модуль найбільшого зміщення точок середовища відносно положень рівноваги.
- **Період (T)** – час одного повного коливання.
- **Частота (ν)** – число повних коливань певної точки хвилі за одиницю часу. $[\nu] = 1 \text{ Гц}$

Примітка: частота – основна характеристика простого тону.

- **Швидкість (v)** поширення хвилі - відстань, на яку поширюється хвиля за одиницю часу.
- **Довжина хвилі (λ)**— відстань, на яку поширюється хвиля за час, що

дорівнює періоду T : $\lambda = vT$.

- **Інтенсивність (I)** чисельно дорівнює енергії E , яку переносить хвиля через одиницю площі S поверхні за одиницю часу t в перпендикулярному до поверхні напрямку:

$$I = \frac{E}{S \cdot t} \qquad [I] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

- **Акустичний спектр** – це характеристика, в якій вказані частоти і відповідні їм інтенсивності всіх простих тонів, що входять до складу складного звуку (рис.1).

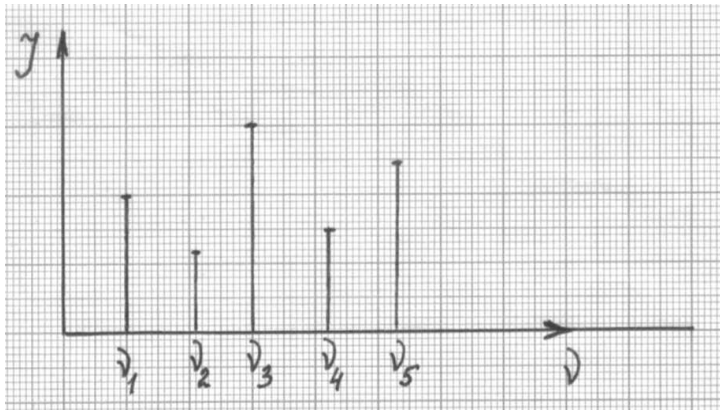


Рис. 1. Акустичний спектр складного звуку. ν_1 – частота основного тону.

- **Акустичний тиск** – це додатковий тиск ΔP (надлишковий над середнім тиском), що утворюється в ділянках згущення частинок середовища при проходженні через нього звукової хвилі (рис.2). Для плоскої гармонічної хвилі акустичний тиск ΔP зв'язаний з інтенсивністю I звуку співвідношенням:

$$I = \frac{(\Delta P)^2}{\rho \cdot v}$$

де ρ – густина середовища; v – швидкість звуку;

$\rho \cdot v$ – акустичний опір середовища.

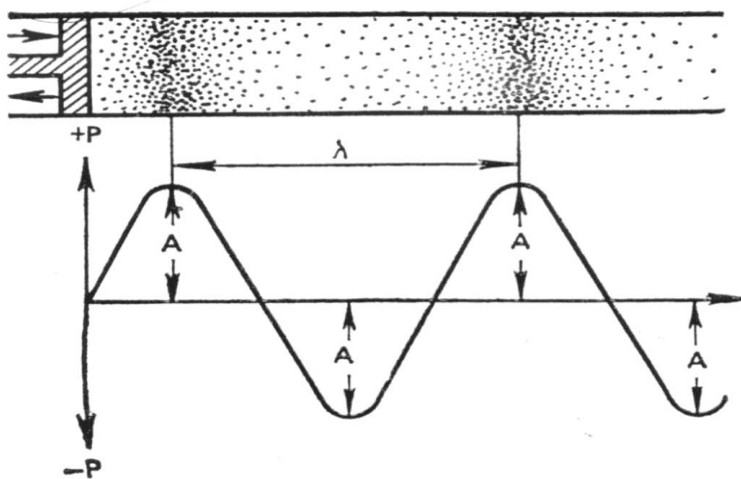


Рис.2

3. Особливості поширення звуку у газоподібному, рідкому та твердому середовищах (швидкість поширення, коефіцієнт відбивання та коефіцієнт пропускання).

Звук поширюється в будь-якому пружному середовищі: твердому, рідкому чи газоподібному, - але не може поширюватися в просторі, де немає речовини. В різних середовищах швидкість поширення звуку є різною. Найбільша швидкість звуку в твердих тілах, дещо менша в рідинах, а найменша в газах. *Наприклад, швидкість звуку у повітрі приблизно 330 м/с, у воді – 1450 м/с, а в залізі – 5000 м/с.*

Швидкість звуку залежить також від властивостей середовища (густини, температури, та ін.), в якому розповсюджується звук. *Наприклад, у повітрі при підвищенні температури на 1°C швидкість звуку збільшується приблизно на 0,60 м/с.*

Добуток густини середовища на швидкість звуку в ньому називають **акустичним опором** (імпедансом) середовища: $Z = \rho \cdot v$.

Акустичний опір середовища – важлива характеристика середовища, яка визначає умови відбивання і заломлення хвилі на межі розділу двох середовищ.

Закони відбивання і заломлення звукової хвилі аналогічні законам відбивання і заломлення світла.

Нехай акустичний опір повітря ($z_1 = \rho_1 \cdot v_1$), рідини ($z_2 = \rho_2 \cdot v_2$), причому $z_2 > z_1$. Звукова хвиля падає на межу розділу цих двох середовищ під кутом α . Інтенсивність падаючої хвилі $I_{над}$, інтенсивність відбитої хвилі $I_{в}$, а інтенсивність хвилі, яка перейшла в друге середовище, $I_{пр}$ (рис.3).

Величину $K_{\epsilon} = \frac{I_{\epsilon}}{I_{над}}$ називають **коефіцієнтом відбивання** звукової хвилі, а

величину $K_{пр} = \frac{I_{пр}}{I_{над}}$ називають **коефіцієнтом пропускання** звукової хвилі.

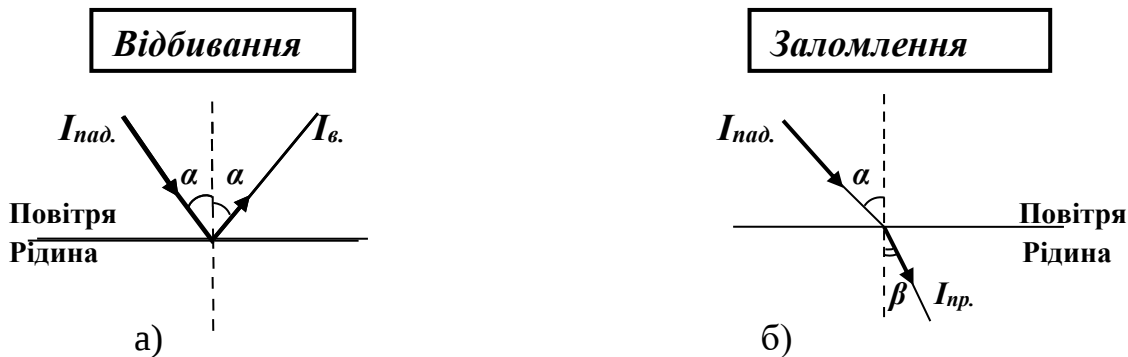


Рис. 3.

Приклади розв'язування задач:

Задача 1. На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-5} Вт/м^2 . Інтенсивність звукової хвилі, що пройшла в друге середовище – 10^{-9} Вт/м^2 . Чому дорівнює коефіцієнт пропускання звукової хвилі?

Розв'язування:

За означенням коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$K_{пр} = \frac{I_{пр}}{I_{над}} = \frac{10^{-9}}{10^{-5}} = 10^{-4} = 0,0001 \text{ або } 0,01\%.$$

Відповідь: $K_{пр} = 0,01\%$.

Коефіцієнти відбивання і пропускання залежать від співвідношення акустичних опорів ($z = \rho \cdot v$) двох середовищ, які межують між собою:

- Якщо акустичні опори обох середовищ однакові ($\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$), то звукова хвиля при нормальному (перпендикулярному) падінні перейде межу розділу без відбивання, тобто $K_{np} = 1 = \max$.
- Якщо акустичний опір другого середовища більший, ніж акустичний опір першого середовища ($\rho_2 v_2 > \rho_1 v_1$), то чим більша різниця акустичних опорів цих середовищ, тим більша частина енергії звукової хвилі відбивається і менша переходить в друге середовище.
- Якщо акустичний опір другого середовища набагато більший, ніж акустичний опір першого середовища ($\rho_2 v_2 \gg \rho_1 v_1$), то коефіцієнт пропускання обчислюється за формулою: $K_{np} = 4 \frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2}$ і буде $K_{np} \ll 1$.

Наприклад: коефіцієнт пропускання звукової хвилі з повітря в воду 0,123%, тобто дуже мала частина звукової енергії проходить з повітря в воду.

Безпосередня передача звукових коливань з повітря в рідке середовище внутрішнього вуха відбувається лише з великою втратою енергії. На основі розрахунків було встановлено що ця втрата енергії досягає в середньому 99,9%. Отже, слуховий рецептор не може сприймати звукові сигнали подібної інтенсивності і забезпечувати акустичне спілкування в життєдіяльності людини.

Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха полягає в трансформації звукових коливань повітря більшої амплітуди та малої сили в коливання рідини внутрішнього вуха з малою амплітудою та великою силою, в результаті чого звукові коливання доходять до сприймаючих елементів внутрішнього вуха, зберігаючи необхідну інтенсивність.

Використовуючи технічну мову, можна сказати, що середнє вуха узгоджує акустичний опір повітря середнього вуха і рідини внутрішнього вуха, внаслідок чого суттєво зменшуються втрати інтенсивності звукової хвилі при переході з повітря в рідке середовище внутрішнього вуха (детальніше цей процес буде розглянуто в наступній темі).

4. Слухові (суб'єктивні) характеристики звуку. Їх зв'язок з фізичними характеристиками звуку.

♦ Слухові характеристики звуку:

- **Висота** – слухова характеристика частоти основного тону звуку.
- **Тембр** – слухова характеристика частот і амплітуд обертонів звуку, тобто суб'єктивна характеристика спектрального складу звуку.
- **Гучність** – рівень слухового відчуття над його порогом. Гучність складним чином залежить від фізичних властивостей звуку: інтенсивності (звукового тиску), частоти і форми коливань.

♦ Залежність слухових характеристик від фізичних

Слухові	Фізичні	Залежність між ними
Висота	Частота основного тону	<i>Прямо пропорційна</i> (чим більша частота основного тону, тим більша висота).
Гучність E	Інтенсивність I Частота ν	Залежність $E = f(I, \nu)$ складна. 1. Якщо $I = const$, то: • від 16 до 1000 Гц – гучність E збільшується; • від 1000 до 5000 Гц – $E = max$; • від 5000 до 20000 Гц – гучність E зменшується. 2. Якщо $\nu = const$, то чим більше інтенсивність I, тим більше гучність.
Тембр	Акустичний спектр	Залежності немає: який спектр, такий і тембр. <i>Наприклад:</i> • багато високих частот мають сигнали пожежної, швидкої допомоги та ін.; • якщо багато низьких частот – тоді голос людини приємний.

5. Поріг чутності, поріг больового відчуття, область чутності.



Рис.4

Область чутності людини (рис. 4) обмежена:

зліва : частотою $\nu = 20$ Гц;

справа: частотою $\nu = 20000$ Гц;

знизу: кривою порогу чутності;

зверху: кривою порогу больового відчуття.

Поріг чутності - це мінімальне значення інтенсивності звуку, при якій звук ще сприймається органами слуху.

Поріг больового відчуття – це мінімальне значення інтенсивності звуку, при якій виникає больове відчуття у вухах.

Поріг чутності }
Поріг болю } залежать від частоти звуку і органу слуху людини.

Примітка: з віком поріг чутності людини збільшується, а поріг больового відчуття – зменшується.

6. Рівень інтенсивності. Закон Вебера-Фехнера. Шкали рівнів інтенсивності та рівнів гучності. Криві рівної гучності.

Тон частотою 1000 Гц вухо людини сприймає в найбільшому діапазоні інтенсивності: від $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ до $I_{\text{max}} = 10 \text{ Вт/м}^2$.

Як видно з рис. 4 шкала інтенсивності звуку не зручна в користуванні. В такому випадку зручно використовувати логарифмічну шкалу рівнів інтенсивності.

Рівень інтенсивності L звуку - це десятковий логарифм відношення інтенсивності звуку (I) до значення $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, що відповідає порогу чутності тону з частотою 1000 Гц:

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \quad [L] = 1 \text{ Бел (Б)} = 10 \text{ децибел}$$

При створенні шкали рівнів інтенсивності значення $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ приймають за початковий рівень шкали $L=0$ (рис.5, шкала L , дБ), а значення L для будь-якої іншої інтенсивності I визначають через десятковий логарифм її відношення до I_0 , тобто: $L = \lg(I/I_0)$.

Приклади розв'язування задач:

Задача 2. Для звуку частотою 1000 Гц інтенсивність $I = 10^{-7} \text{ Вт/м}^2$. Чому дорівнює рівень інтенсивності?

Розв'язання:

Рівень інтенсивності:
$$L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{10^{-7}}{10^{-12}} = \lg 10^5 = 5 \text{ Б} = 50 \text{ дБ}$$

Відповідь: $L = 50 \text{ дБ}$.

Задача 3. Для звуку частотою 1000 Гц інтенсивність $I_{\max} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (поріг больового відчуття). Чому дорівнює рівень інтенсивності?

Розв'язання:

$$\text{Рівень інтенсивності: } L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{10^1}{10^{-12}} = \lg 10^{13} = 13\text{Б} = 130 \text{ дБ}$$

Відповідь: $L=130 \text{ дБ}$.

♦ Закон Вебера-Фехнера.

Основою суб'єктивного відчуття гучності звуку є здатність людини розрізняти звуки за їх інтенсивністю. Чим гучніше звук, тим вище він за рівнем слухового відчуття, тим більша його інтенсивність.

Тобто, *гучність звуку можна визначити як рівень слухового відчуття над його порогом.*

Залежність між інтенсивністю звуку I і рівнем його слухового відчуття (гучністю E) має складний характер, вона відтворює адаптаційні властивості вуха до зміни інтенсивності у досить широкому діапазоні.

Експериментальні дослідження свідчать про те, що відчуття зміни гучності звуку dE прямо пропорційне до зміни інтенсивності звуку dI . Закон Вебера–Фехнера зв'язує гучність звуку з його інтенсивністю.

Закон Вебера-Фехнера: відчуття подразнення E прямо пропорційне десятковому логарифму сили самого подразнення I :

$$E = k \lg \frac{I}{I_0}$$

Іншими словами: якщо сила подразнення I зростає в геометричній прогресії (в 100, 1000,... разів), то відчуття цього подразнення E зростає в арифметичній прогресії (в 2, 3, ... рази).

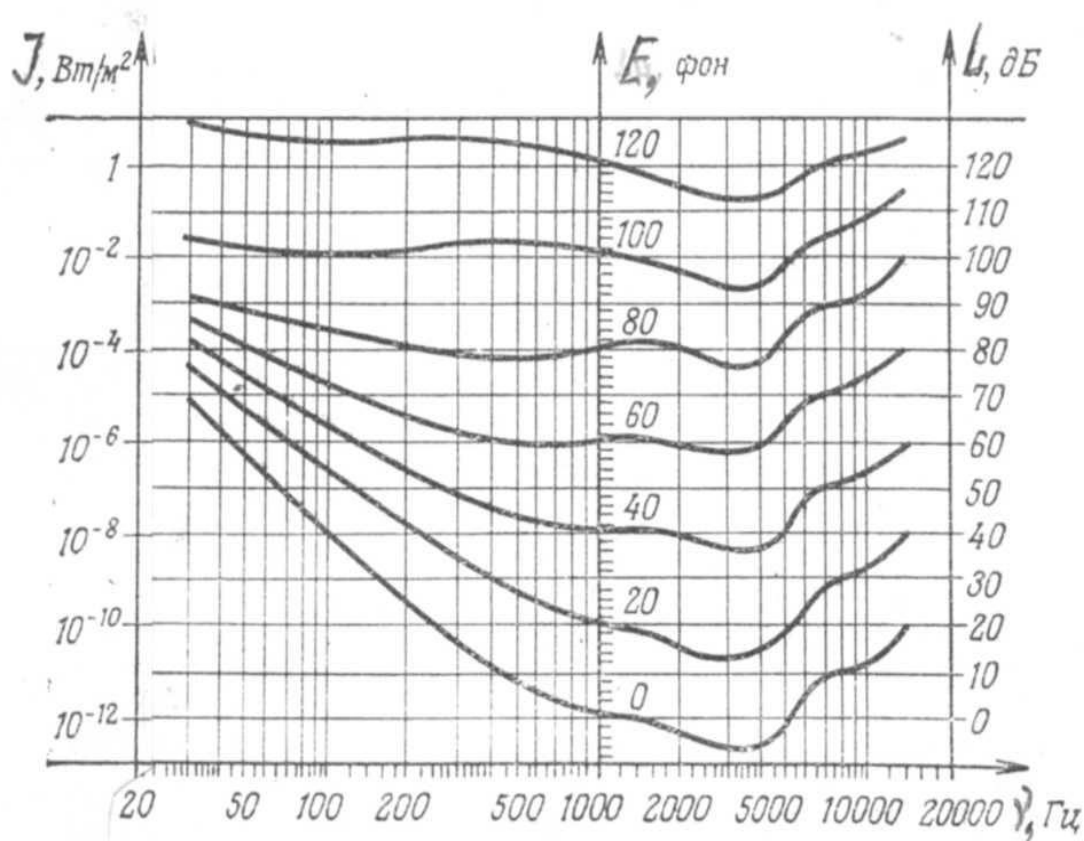


Рис. 5. Криві рівної гучності.

Ординати: I , Вт/м^2 - шкала інтенсивності;
 L , дБ - шкала рівнів інтенсивності;
 E , фон - шкала рівнів гучності.

Оскільки в законі Вебера–Фехнера коефіцієнт пропорційності k залежить від частоти звуку, то шкала рівнів інтенсивності L та шкала рівнів гучності E збігаються тільки на частоті $\nu = 1000 \text{ Гц}$ (рис.5). Одиниці шкали гучності також називають белом та децибелом. Щоб відрізнити ці шкали, децибел у шкалі гучності називають **фоном**. Бел гучності відповідає зміні гучності тону з частотою $\nu = 1000 \text{ Гц}$ при зміні його інтенсивності у 10 разів.

Криві однакової гучності - це лінії, на яких людина відчуває звук різних частот однаково гучними.

Приклади розв'язування задач:

Задача 4. Який рівень гучності відповідає звуку, частота якого 100Гц , а інтенсивність 10^{-6}Вт/м^2 ?

Розв'язання:

1) Рівень інтенсивності: $L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{10^{-6}}{10^{-12}} = \lg 10^6 = 6\text{Б} = 60\text{ дБ}$

2) На рис.6 видно, що прямі $L=60\text{ дБ}$ і $\nu=100\text{ Гц}$ пересікаються в точці, яка лежить на кривій гучності $E=30\text{ фон}$. Отже, звуку, частота якого 100Гц , а інтенсивність 10^{-6}Вт/м^2 , відповідає гучність $E=30\text{фон}$.

Відповідь: $L=30\text{ дБ}$.

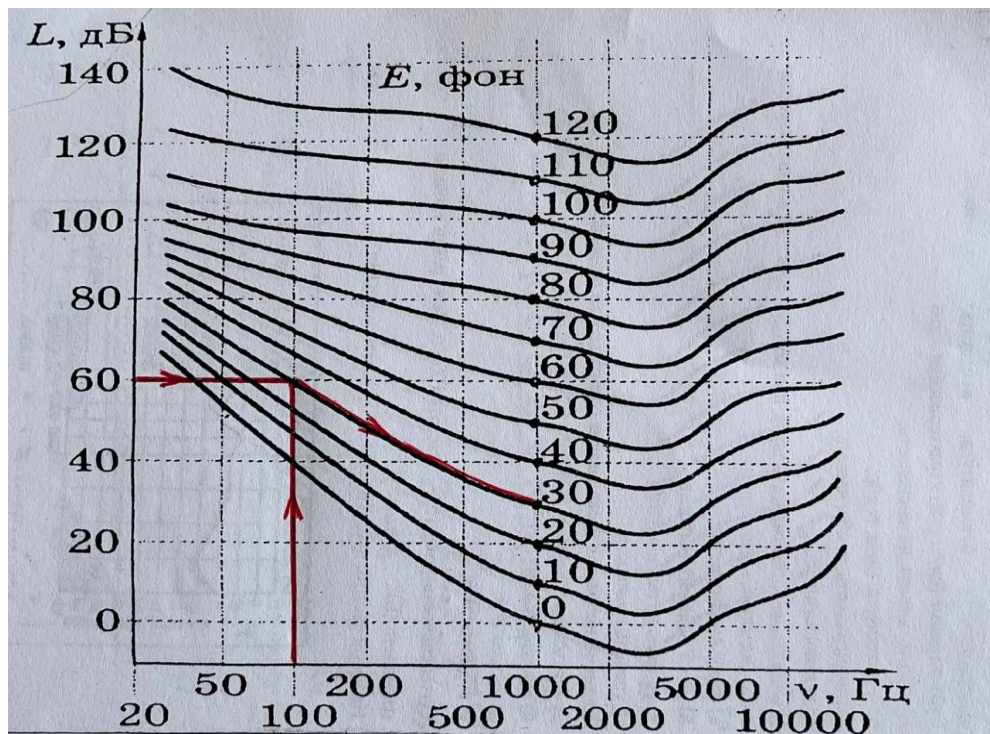


Рис.6.

Задача 5. Звуку, частота якого 200Гц , відповідає рівень гучності 70 фон . Чому дорівнює інтенсивність цього звуку?

Розв'язання:

1) З рис. 6 видно, що пряма $\nu=200$ Гц і крива гучністю $E=30$ фон перетинаються в точці, що відповідає рівню інтенсивності $L=80$ дБ.

2) Рівень інтенсивності:

$$L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{10^{-x}}{10^{-12}} = 80 = \lg 10^8, \text{ тоді } I = 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Відповідь: 10^{-4} Вт/м^2 .

7. Фізичні основи звукових методів досліджень у клініці: аускультация, перкусія, фонокардіографія, аудіометрія.

Аускультация – це метод прослуховування звуків, які виникають в організмі людини в результаті функціонування внутрішніх органів

Медичні інструменти для аускультції : стетоскоп, фонендоскоп, стетофонендоскоп.

За допомогою медичних інструментів для аускультції можна вислухувати:

- *серце* (зміну тонів і появу шумів);
- *легені* (дихальні шуми и хрипи);
- *шлунок і кишечник* (наявність перистальтики);
- *плід* (серцебиття).

Перкусія – це метод дослідження внутрішніх органів за допомогою постукування по поверхні тіла і аналізу виникаючих при цьому звуків.

Характер виникаючих звуків залежить від:

- способу постукування;
- властивостей тканин організму (густини, пружності...)

Метою перкусії є визначення розмірів і меж внутрішніх органів, а також виявлення патологічних утворень. Перкусія зберігає велике практичне значення, незважаючи на появу нових діагностичних методик.

Фонокардіографія – це метод графічної реєстрації тонів і шумів серця.

Діагностичний прилад для фонокардіографії – фонокардіограф.

Загальна схема фонокардіографа показана на рис. 7, приклад фонокардіограми – на рис. 8.

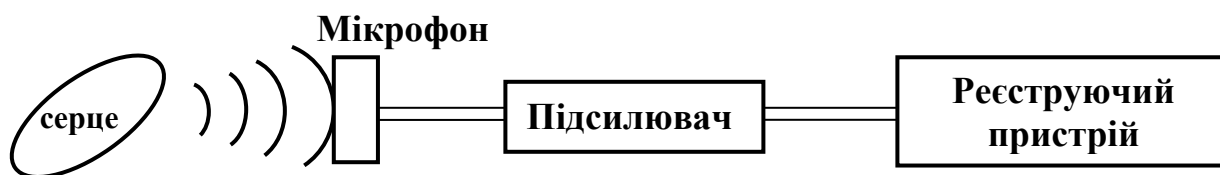


Рис. 7.



Рис. 8.

Аудіометрія – це метод дослідження гостроти слуху пацієнта.

Діагностичний прилад для аудіометрії – аудіометр.

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Звук	Звук – це механічні хвилі з частотою від 16 до 20000 Гц .
Частота	Частота – число повних коливань певної точки хвилі за одиницю часу.
Інтенсивність	Інтенсивність чисельно дорівнює енергії, яку переносить хвиля через одиницю площі поверхні за одиницю часу в перпендикулярному до поверхні напрямку.

Акустичний спектр	Акустичний спектр – це характеристика, в якій вказані частоти і відповідні їм інтенсивності всіх простих тонів, що входять до складу складного звуку.
Акустичний тиск	Акустичний тиск – це додатковий тиск (надлишковий над середнім тиском), що утворюється в ділянках згущення частинок середовища при проходженні через нього звукової хвилі.
Висота	Висота – слухова характеристика частоти основного тону звуку.
Тембр	Тембр – слухова характеристика частот і амплітуд обертонів звуку, тобто суб'єктивна характеристика спектрального складу звуку.
Гучність звуку	Гучність звуку - рівень слухового відчуття над його порогом.
Аускультация	Аускультация – це метод прослуховування звуків, які виникають в організмі людини в результаті функціонування внутрішніх органів.
Перкусія	Перкусія – метод дослідження внутрішніх органів за допомогою постукування по поверхні тіла і аналізу виникаючих при цьому звуків.
Фонокардіографія	Фонокардіографія – метод графічної реєстрації тонів і шумів серця.
Аудіометрія	Аудіометрія – метод дослідження гостроти слуху пацієнта.
Поріг чутності	Поріг чутності - мінімальне значення інтенсивності звуку, при якій звук ще сприймається органами слуху.
Поріг больового відчуття	Поріг больового відчуття – мінімальне значення інтенсивності звуку, при якій виникає больове відчуття у вухах.

3.5. Розв'язати задачі:

- Задача 1.** На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-6} Вт/м². Коефіцієнт пропускання звукової хвилі дорівнює 0,01. Чому дорівнює інтенсивність звукової хвилі, що перейшла в друге середовище?
- Задача 2.** На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-4} Вт/м². Коефіцієнт відбивання звукової хвилі дорівнює 0,30. Чому дорівнює інтенсивність відбитої звукової хвилі?
- Задача 3.** Який рівень гучності відповідає звуку, частота якого 200 Гц, а інтенсивність 10^{-8} Вт/м²?

3.5. Завдання для самоконтролю (тести):

- 1. Звук – це механічні хвилі з частотою:**
- а) менше 20 Гц;
 - б) від 20 Гц до 20 кГц;
 - в) більше 20 кГц;
 - г) менше 16 Гц.
- 2. В медицині індивідуальне сприйняття звуку людиною прийнято характеризувати:**
- а) порогам чутності і больового відчуття;
 - б) інтенсивністю сприйняття;
 - в) гучністю звуку;
 - г) акустичним спектром.
- 3. До об'єктивних характеристик звуку відносяться:**
- а) гучність, частота, тембр;
 - б) частота, інтенсивність, акустичний спектр, акустичний тиск;
 - в) акустичний спектр, висота, акустичний тиск;

г) гучність звуку і акустичний спектр.

4. До суб'єктивних характеристик звуку відносяться:

- а) гучність, висота, тембр;
- б) частота, інтенсивність, акустичний спектр;
- в) висота, акустичний спектр, акустичний тиск;
- г) гучність звуку і акустичний спектр.

5. Аудіометрія – це один з методів:

- а) дослідження гостроти слуху людини;
- б) терапії органів слуху людини;
- в) вимірювання швидкості кровотоку;
- г) елетрофізіотерапії.

6. Рівень слухового сприйняття над його порогом називається:

- а) рівнем гучності; б) тембром; в) висотою; г) силою звуку.

7. Мінімальні значення інтенсивності звуку на різних частотах, при яких людина починає чути звук, називається:

- а) порогом больового відчуття;
- б) верхнім порогом;
- в) порогом слухового відчуття або нижнім порогом;
- г) порогом больового відчуття або верхнім порогом чутності.

8. Мінімальні значення інтенсивності звуку на різних частотах, при яких у вухах пацієнта виникає відчуття болю, називається:

- а) порогом слухового відчуття;
- б) порогом чутності;
- в) нижнім порогом або кривою нульової гучності;
- г) порогом больового відчуття або верхнім порогом чутності.

9. Інтенсивність звуку становить 10^{-5} Вт/м². Чому дорівнює рівень інтенсивності звуку?

- а) 80дб; б) 40дб; в) 70дб; г) 60дб.

10. Фонокардіографія – це метод:

- а) дослідження життєвої ємності легенів;
- б) графічного запису звукових явищ, зумовлених роботою серця;
- в) вислуховування звуків серця за допомогою фонендоскопа;
- г) графічного запису біоелектричних потенціалів серця.

Правильні відповіді: 1 - б; 2 - а; 3 - б; 4 - а; 5 – а; 6 – а; 7 – в; 8– г; 9 – в; 10 – б.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - К.: Книга плюс, 2005, с. 146-178, 191-194.
2. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - Вінниця: Нова книга, 2017, с. 166-174.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. Механічні хвилі з частотою від 16 до 20000 Гц називаються:
 - а) ультразвуком; б) звуком; в) інфразвуком.
2. Частота – це кількість повних коливань точки:
 - а) за одну секунду; в) за одиницю часу;
 - б) за один період; г) за час коливання.
3. За якою формулою обчислюється інтенсивність звуку (Е – енергія хвилі; S – площа поверхні, через яку хвиля переносить енергію; Ф – потік енергії; t – час перенесення енергії)?

$$\text{а) } I = \frac{E}{\Phi \cdot t}; \quad \text{б) } I = \frac{\Phi}{S \cdot t}; \quad \text{в) } I = \frac{E}{S}; \quad \text{г) } I = \frac{E}{S \cdot t}.$$

4. Одиниця вимірювання інтенсивності у СІ:
 - а) Вт; б) Вт/м²; в) фон; г) дБ.
5. Акустичний спектр звуку – це...
 - а) графік складного коливання;
 - б) характеристика звуку за його інтенсивністю;

- в) характеристика звуку, в якій вказані частоти та інтенсивності простих тонів, що входять до складу складного звуку;
- г) графік порогу слухового відчуття.

6. Закон Вебера-Фехнера виражається формулою:

$$\text{а) } E = k \lg \frac{I}{I_0}; \quad \text{б) } E = \lg \frac{I_0}{I}; \quad \text{в) } E = k \lg \frac{I_0}{I}; \quad \text{г) } E = k \frac{I_0}{I}$$

7 Суб'єктивні характеристики звуку:

- а) частота, інтенсивність, амплітуда;
- б) інтенсивності простих тонів звуку;
- в) амплітуда, акустичний спектр, рівень інтенсивності;
- г) гучність, висота тону і тембр.

8. Тембр – це суб'єктивна характеристика:

- а) частоти основного тону звуку;
- б) інтенсивності простих тонів звуку;
- в) амплітуди простих тонів звуку;
- г) частот і амплітуд обертонів звуку.

9. Висота звуку – це суб'єктивна характеристика...

- а) частоти звуку;
- б) частоти основного тону звуку;
- в) інтенсивності і частоти звуку;
- г) акустичного спектру звуку.

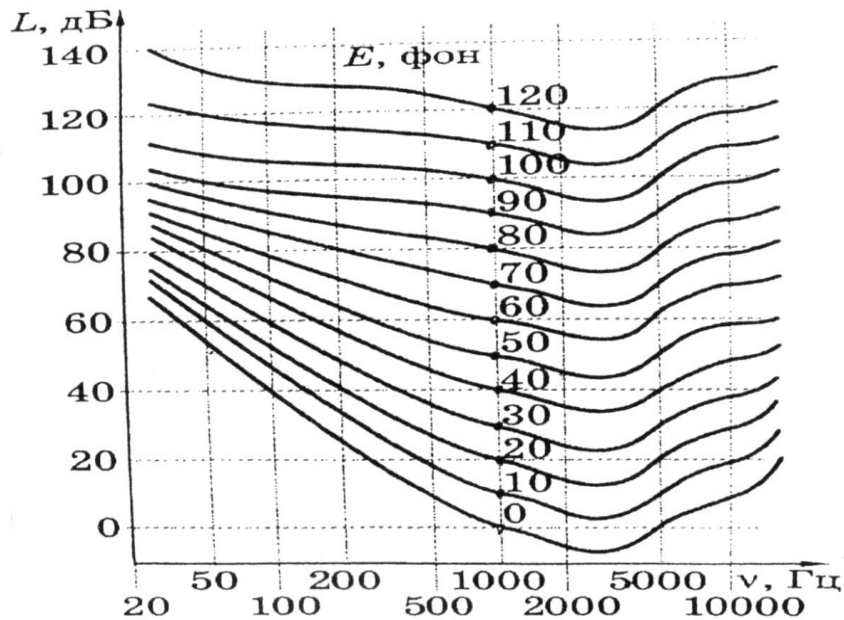
10. Інтенсивність звуку становить 10^{-6} Вт/м². Чому дорівнює рівень інтенсивності звуку?

- а) 70дб; б) 40дб; в) 80дб; г) 60дб.

11. Від чого залежить чутність звуку?

- а) від частоти коливань;
- б) від частоти звуку;
- в) від частоти та інтенсивності звуку;
- г) від амплітуди коливань.

12. Який рівень гучності відповідає звуку, частота якого 50 Гц, а інтенсивність 10^{-4} Вт/м²?



- а) 10 фон;
- б) 80 фон;
- в) 60 фон;
- г) 50 фон.

13. За поріг чутності при частоті 1000 Гц прийнято таку інтенсивність:

- а) 10^{-12} Вт/м²;
- б) 10^{-10} Вт/м²;
- в) 10^{-6} Вт/м²;
- г) 10 Вт/м².

14. За поріг больового відчуття при частоті 1000 Гц прийнято таку інтенсивність:

- а) 10^{-12} Вт/м²;
- б) 10^{-10} Вт/м²;
- в) 10^{-6} Вт/м²;
- г) 10 Вт/м².

15. Аускультация – це:

- а) визначення життєвої ємності легенів;
- б) графічний запис звукових явищ, зумовлених роботою серця;
- в) вислуховування звуків внутрішніх органів за допомогою фонендоскопа;
- г) графічний запис біоелектричних потенціалів серця.

16. Метод дослідження внутрішніх органів за допомогою постукування по поверхні тіла і аналізу виникаючих при цьому звуків – це:

- а) Аудиометрія;
- б) Аускультация;
- в) Фонокардіографія;
- г) Перкусія.

Тема: ЗНЯТТЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУХА НА ПОРОЗІ ЧУТНОСТІ

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Слухова система забезпечує акустичне спілкування в життєдіяльності людини, зв'язуючи безпосередній приймач звуку з головним мозком. Використовуючи поняття кібернетики, можна сказати, що слухова система приймає, переробляє і передає інформацію – цим забезпечує акустичне спілкування в життєдіяльності людини. За певних причин у людини може погіршуватись здатність сприймати звуки. Це є актуальним в даний час, оскільки кожна шоста людина в світі має понижений слух.

Для оцінки гостроти слуху пацієнта використовують клінічний метод дослідження – аудіометрію. Діагностичний прилад для аудіометрії – аудіометр. Знання причин погіршення гостроти слуху дозволяє відновити її або сповільнити чи попередити її зниження.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- фізичні та слухові характеристики звуку;
- основні поняття: поріг чутності, поріг больового відчуття, область чутності;
- закон Вебера-Фехнера;
- суть та інформативність аудіометрії як звукового методу дослідження у клініці;
- призначення і можливості повітряного та кісткового способу дослідження гостроти слуху;

Вміти:

- демонструвати навички роботи з аудіометром;
- отримувати аудіограму та проводити її аналіз.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Фізична модель органу слуху.
2. Послідовність поширення звуку у вусі.
3. Частотний аналіз звуку в завитці.
4. Аудіометрія. Загальна схема, принцип дії та призначення аудіометра.
5. Кістковий та повітряний методи дослідження слуху.
6. Аудіограма та її аналіз.

3.2. Зміст теми

1. Фізична модель органу слуху

Орган слуху людини можна моделювати як систему, яка складається з двох частин: звукопровідної і звукоприймаючої.

- *Звукопровідна частина* – зовнішнє і середнє вухо.
- *Звукоприймаюча частина* – внутрішнє вухо.

Зовнішнє вухо складається з вушної раковини **1** і зовнішнього слухового проходу **2**, який закритий барабанною перетинкою **3** (рис. 1).

Середнє вухо починається за барабанною перетинкою і являє собою камеру, заповнену повітрям. Середнє вухо сполучене з носоглоткою через Євстахієву трубу, завдяки чому тиск по обидва боки барабанної перетинки однаковий. У порожнині середнього вуха знаходяться три слухові кісточки, зв'язані між собою: молоточок **4**, ковадло **5** та стремінце **6**. Молоточок сполучений з барабанною перетинкою, сприймає її коливання і через інші дві кісточки передає ці коливання до овального віконця внутрішнього вуха.

Внутрішнє вухо міститься в товщі скроневої кістки і має дуже складну будову. У ньому розрізняють такі частини: завитку **3**, три напівколових канали **К**, що утворюють вестибулярний апарат людини (рис. 2). Головною частиною

внутрішнього вуха є завитка – орган який сприймає звукові коливання і перетворює їх в електричний сигнал.

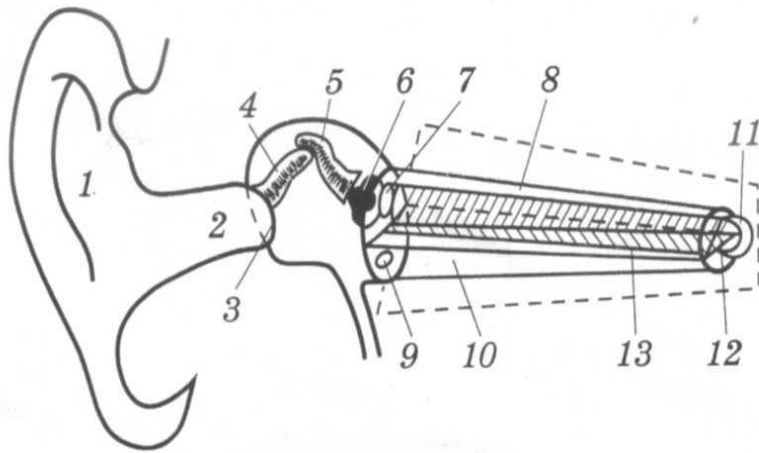


Рис. 1.

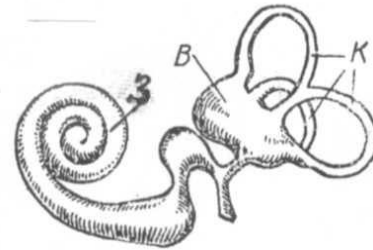


Рис. 2.

Завитка людини – кісткове утворення довжиною майже 35 мм і має форму конусоподібної спіралі. На рис.1 завитка (обмежена штриховою лінією) зображена розгорнутою для зручного розгляду. Внутрішня порожнина завитки розділена двома мембранами (вестибулярною **12** і основною **13**) на три канали: вестибулярний **8**, барабанний **10** і завитковий. Основною називають товсту (нижню) мембрану, вестибулярною – тонку (верхню) мембрану.

Вестибулярний (верхній) канал починається від овального вікна **7**, барабанний (нижній) – від круглого вікна **9**. Ці обидва канали заповнені перилімфою і з'єднані в області купола завитки через малий отвір (гелікотрему) **11**. Завитковий канал (середній) – простір між вестибулярною і основною мембранами, заповнений ендолімфою. Основна мембрана складається з волокон, натягнутих упоперек ходу мембрани (на зразок драбини). На основній мембрані знаходиться кортієв орган, який містить волоскові клітини (рецепторні клітини з волосками на їх верхівці). На них закінчуються чутливі волокна слухового нерва. Над волосковими клітинами кортієвого органа знаходиться покривна мембрана (пластинка), яка нависає над ними, наче дах.

2. Послідовність поширення звуку у вусі

Звукова хвиля, пройшовши зовнішнє вухо, настовхується на туго натягнуту барабанну перетинку і приводить її в рух. З барабанною перетинкою зв'язана система слухових кісточок середнього вуха, які передають звукові коливання на овальне вікно, яке відокремлює рідину (перилімфу) внутрішнього вуха від повітряного простору середнього вуха. Рух рідини у вестибулярному і барабанному каналах внутрішнього вуха змушує основну мембрану здійснювати коливання в залежності від частоти і сили звуку. Рух основної мембрани стимулює рецепторні клітини, розташовані в кортієвому органі, в результаті з'являються потенціали дії, які передаються слуховими нервами в кору головного мозку.

Кожна складова органу слуху відіграє певну роль для слуху. А саме:

- **Вушні раковини** у людини не грають суттєвої ролі для слуху. Вони збирають звукові хвилі, збільшують їх тиск майже вдвічі, а головне – забезпечують спрямованість слухового сприйняття і локалізацію джерела звуку.
- **Зовнішнє вухо** забезпечує резонансне сприйняття звуків в широкому діапазоні частот, максимум якого припадає на частоти 2–4 кГц. Відомо, що акустичний резонанс має місце, якщо довжина хвилі в 4 рази більша довжини зовнішнього слухового проходу. В результаті цього посилення рівня інтенсивності в зовнішньому слуховому проході становить 7–15дБ.
- **Середнє вухо** забезпечує узгодження акустичних опорів повітря і рідини внутрішнього вуха, внаслідок чого суттєво зменшуються втрати інтенсивності звукової хвилі при її переході з повітря середнього вуха в рідке середовище внутрішнього вуха.

Звукові коливання діють на барабанну перетинку, через слухові кісточки на овальне вікно, а потім передаються рідинам і мембранам (вібруючим структурам) внутрішнього вуха. Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха полягає в трансформації звукових коливань повітря більшої амплітуди та малої сили в коливання рідини внутрішнього вуха з малою амплітудою та великою силою, в результаті чого звукові коливання доходять до

сприймаючих елементів внутрішнього вуха, зберігаючи необхідну інтенсивність. Отже, середнє вухо збільшує передачу зовнішнього тиску внутрішньому вусі в 26 раз, що відповідає посиленню рівня інтенсивності на рівні 28дБ. А загальне максимальне посилення (включаючи і те, що виникає внаслідок резонансу в зовнішньому слуховому проході) становить 35–40дБ.

Крім того середнє вухо виконує ще одну функцію – демпферування, тобто послаблення передачі звукових коливань при їх великій інтенсивності (на рівні болювого відчуття).

– **Внутрішнє вухо** перетворює механічні коливання в електричний сигнал. Перетворювачем механічних коливань в електричний сигнал служить кортієв орган *КО*, що розміщений в завитковому каналі *З* на основній мембрані *ОМ* (рис. 3а). Він складається з чутливих волоскових клітин *ВК* (рис. 3б), до яких підходять розгалуження волокон слухового нерва. Над кортієвим органом розміщена покривна пластинка *ПМ*. Під час дотикання волоскових клітин *ВК* з покривною пластинкою (рис.3б) в клітинах виникають нервові імпульси, які передаються в центральну нервову систему, звідки до нервових клітин відповідної ділянки кори головного мозку.

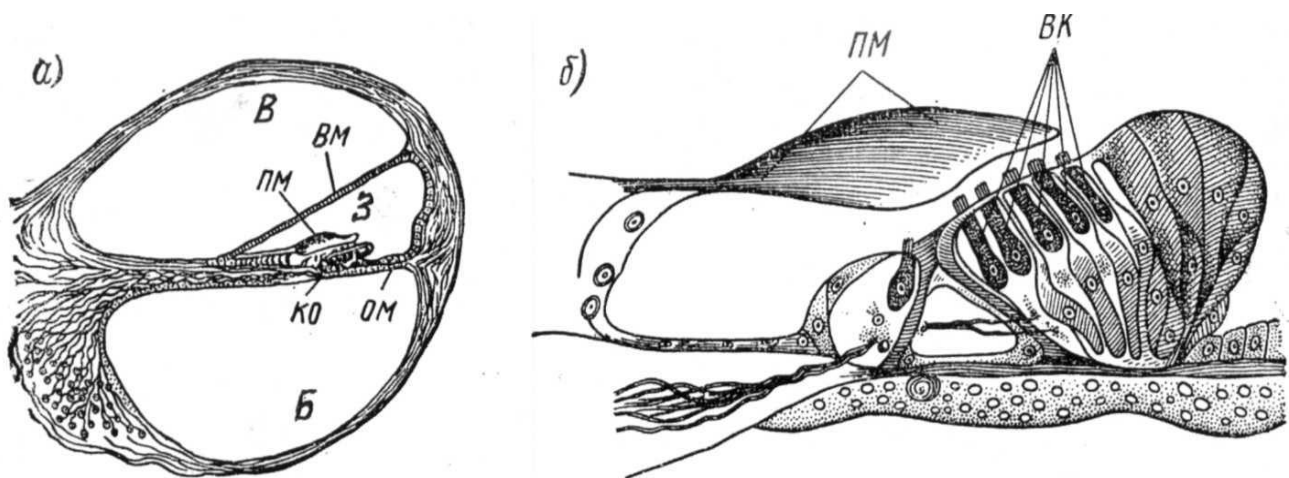


Рис. 3

3. Частотний аналіз звуку в завитці

Аналіз звуку в завитці відбувається внаслідок частотно-відбіркової селекції сигналів уздовж основної мембрани за допомогою резонансу. Цю точку зору вперше висловив німецький фізіолог і фізик Г.Гельмгольц (1863). Коротко його “резонансну теорію” можна викласти таким чином. Основна мембрана складається з волокон (струн) різної довжини. Найкоротші волокна розміщені в основі завитки, найдовші – на верхівці. Кожне волокно має резонансну частоту, за якої воно коливається з максимальною амплітудою.

Звуки низької частоти призводять до вібрації довгих волокон, звуки високої частоти – до вібрації коротших волокон. Тобто, відповідно до частоти звуку вібрації відчувають лише певні групи волокон, вони спричиняють збудження волосяних клітин кортієвого органу. Таким чином, завдяки резонансу волокон основної мембрани спіральний орган здійснює первинний частотний аналіз звуку.

Аналогічного висновку дійшов лауреат Нобелівської премії Д. Бекеші після серії дослідів на морських свинках і препаратах завитки людини. Свої погляди на механізм слуху він виклав як теорію “бігучої хвилі” (1960).

За цією теорією, у відповідь на звуковий подразник у середині завитки виникає бігуча акустична хвиля, яка поширюється від основи до верхівки вздовж основної мембрани. Відстань, яку проходить хвиля по мембрані, визначається частотою звуку. Розподіл амплітуд коливань вздовж основної мембрани схематично зображено на рис. 4.

Бігуча хвиля від звуків низьких частот здатна проходити на великі відстані і спричиняти деформацію основної мембрани по всій її довжині, але найбільша амплітуда коливань основної мембрани на верхівці завитки (рис. 4а).

Бігуча хвиля від звуків високих частот проходить меншу відстань і зумовлює максимальну деформацію основної мембрани (а відповідно і максимальне

подразнення волоскових клітин кортієвого органу) переважно в ділянці основної закрутки завитки (рис. 4в).

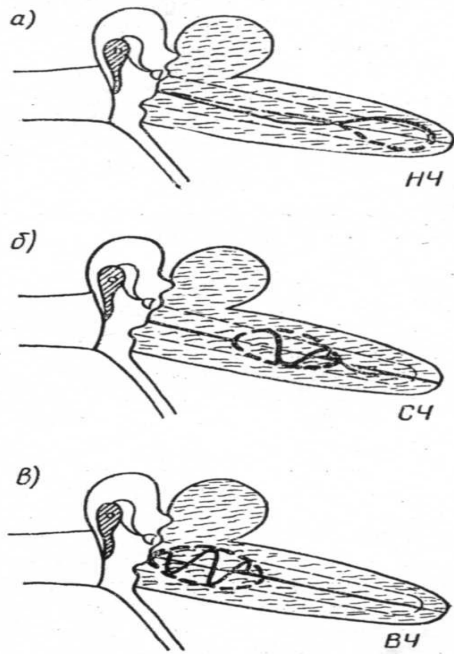


Рис. 4

Амплітуда коливань максимальна в тих клітинах основної мембрани, частота власних коливань яких збігається з частотою звуків, що сприймаються, внаслідок чого виникає резонанс. Цим пояснюється здатність вух сприймати складний звук загалом, хоча кожний простий звук резонує з однією волосковою клітиною.

Під час резонансу змінюється ступінь дотикання волоскових клітин *ВК* з покривною пластинкою (рис. 3б), в зв'язку з чим в клітинах виникають нервові імпульси. Ці імпульси передаються в центральну нервову систему,

звідки до нервових клітин відповідної ділянки кори головного мозку. Відчуття висоти звуку визначається ділянкою максимальної амплітуди коливань основної мембрани.

Отже, основну мембрану можна розглядати як нелінійну коливальну систему, що функціонує подібно до системи механічних мікрорезонаторів, в якій локальне розташування максимального зміщення залежить від частоти коливань. Це локальне подразнення спричиняє виникнення серії електричних імпульсів у певному нервовому волокні, що входить до складу слухового нерва. В цілому, по слуховому нерву в мозок передається серія імпульсів, що несуть інформацію про амплітуду та частоту коливань або інформацію щодо спектрального складу звуку, яка піддається аналізу в слухових центрах кори головного мозку, де остаточно і формується суб'єктивне відчуття звуку.

Варто визначити, що концепція Д.Бекеші по своїй суті не заперечує резонансної теорії Г.Гельмгольца, а лише доповнює її гідродинамічними механізмами (ця теорія має назву гідродинамічної).

4. Аудіометрія. Загальна схема, принцип дії та призначення аудіометра.

Аудіометрія – це метод дослідження гостроти слуху пацієнта, тобто визначення найменшої інтенсивності звуку, при якій він сприймається пацієнтом. В основу методу покладено реєстрацію реакції органу слуху, яка викликана звуковою стимуляцією.

Проведення аудіометрії здійснюється за допомогою діагностичного приладу, який називається аудіометром, у приміщенні з шумоізоляцією. За допомогою аудіометра визначають поріг чутності пацієнта на різних частотах. Загальну схему аудіометра зображено на рис. 5.



Рис. 5.

Генератор аудіометра виробляє електричні коливання таких частот: 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 кГц. Він подає їх по чергові на головні телефони пацієнта (спочатку на синій, а потім на червоний) у вигляді серії із трьох коротких імпульсів. Головні телефони перетворюють електричні коливання у прості тони певного рівня інтенсивності.

При обстеженні пацієнт використовує навушники (через які транслюються звуки різних частот): синій прикладає до лівого вуха, а червоний – до правого. Пацієнт відразу натискає кнопку відповіді кожен раз, як почує звук. Після завершення вимірювання порогу чутності для обох вух прилад видасть на екран

результати тестування. Приклад результату тестування слуху одного із пацієнтів вказаний в таблиці 1.

Таблиця 1

Частота, Гц	500	1000	2000	3000	4000	6000	8000
Пониження слуху лівого вуха, дБ	5	10	20	15	20	15	10
Пониження слуху правого вуха, дБ	30	20	30	35	35	35	40

5. Кістковий та повітряний методи дослідження слуху.

В діагностиці використовують два методи дослідження слуху: через повітряну та кісткову провідності.

Метод повітряної провідності полягає в тому, що звукові коливання передаються до внутрішнього вуха через органи зовнішнього і середнього вуха.

Кісткова провідність звуку відбувається через соскоподібний відросток скроневої кістки (за вухом) до внутрішнього вуха.

Якщо за допомогою повітряної провідності виявили втрату слуху, а за допомогою кісткової – не виявили, то, очевидно, що зниження слуху обумовлене патологією середнього вуха (частіше всього слухових кісточок, суглобів, зв'язок, мембрани та ін.)

6. Аудіограма та її аналіз.

Аудіограма – крива, яка з'єднує точки порогу чутності пацієнта на різних частотах, отримані за допомогою аудіометра.

Результати вимірювання вносяться в систему координат у вигляді точок. По осі ординат вказаний рівень інтенсивності тонів у дБ, а по осі абсцис — частота цих тонів у Гц. Після цього всі точки результату тестування з'єднуються і отримується крива порогу слухового відчуття — аудіограма. Для кожного вуха створюється окрема аудіограма.

На рис.6 наведена аудіограма пацієнта (результати обстеження якого вказані в таблиці 1), де верхня крива відповідає лівому вусі, а нижня –правому.

Примітка: аудіограма лівого вуха відмічена синім кольором, а правого –червоним.

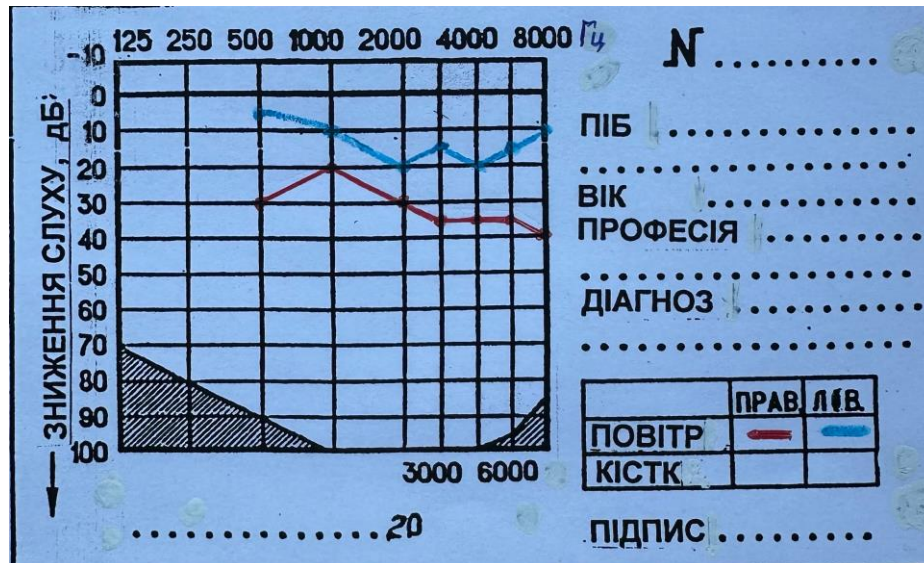


Рис. 6

Аналіз аудіограми

Зіставлення порогів чутності вуха пацієнта на кожній частоті з порогам чутності нормального слуху на відповідних частотах показує втрату слуху на цих частотах. Аналізуючи аудіограму, що на рис.6, можна зробити такі висновки:

1. Найбільша чутливість (найменше пониження слуху) лівого вуха на частоті 500 Гц, а правого на частоті 1000 Гц.
2. Найменша чутливість (найбільше пониження слуху) лівого вуха на частотах 2000 і 4000 Гц, а правого на частоті 8000 Гц.
3. Оскільки точки аудіограми лівого вуха знаходяться в діапазоні рівнів інтенсивності від 0 до 25 дБ (див. таблицю 2), то ліве вухо пацієнта має нормальну гостроту слуху.
4. Оскільки більшість точок аудіограми правого вуха знаходиться в діапазоні від 26 до 40 дБ, то в правому вусі пацієнта спостерігається легка втрата слуху.

Таблиця 2

Ступені втрати слуху	Діапазони рівнів інтенсивності
Нормальний слух	у дітей: від -10 до 20 дБ. у дорослих: від 0 до 25 дБ
Легка втрата слуху	Від 26 до 40 дБ. Люди з цим типом втрати слуху можуть мати деякі труднощі з розумінням розмови, особливо в шумі.
Помірна втрата слуху	Від 41 до 70 дБ. Помірна втрата слуху викличе великі труднощі спілкування без допомоги слухових апаратів.
Важка втрата слуху	Від 71 до 90 дБ. Потужні слухові апарати та вміння читати по губах найкраще підійдуть для підтримки розмови.
Глибока втрата слуху	Від 91 до 120 дБ. Люди з такою втратою слуху дуже поганочують, вони покладаються на читання по губах. Надзвичайно потужні слухові апарати можуть допомогти.

Методи аудіометрії використовують не тільки для визначення відхилення гостроти слуху від норми, але й для діагностування причин порушення слуху.

Своєчасна перевірка слуху вкрай важлива, зокрема, для людей похилого віку, оскільки наслідки фізіологічного старіння організму, які природно зачіпають органи слуху, є причиною розвитку нейросенсорної приглухуватості. Процес порушення звукового сприйняття в даному випадку необоротний, проте діагностика на ранніх стадіях дозволить підібрати слуховий апарат та вжити заходів для запобігання розвитку глухоти.

За певних причин у людини будь-якого віку може погіршуватись здатність сприймати звуки. Це є дуже актуальним в даний час, бо кожна шоста людина в світі має понижений слух. Дані, представлені нижче, показують, що це не є проблема виключно людей похилого віку:

- на 1000 новонароджених, що нормально чують, доводиться 1 дитина з вираженим ступенем глухоти; помірні порушення слуху є у 1—2% новонароджених і дітей раннього віку (за статистикою Всесвітньої організації охорони здоров'я);
- 49% американських студентів і 63% дорослих помітили у себе симптоми втрати [погіршення] слуху (Американська асоціація ларингологів);
- більше 16% дорослих європейців страждають від соціально-значущого зниження слуху. Особливо часто ця проблема виникає у людей старших вікових груп. Згідно зі статистикою, серед людей у віці від 50 до 60 років тих, хто погано чує, приблизно 20%. У віковій категорії 60-70-річних ця величина зростає до 30%, а для людей старше 70 років - перевищує 40% (Джерело: Evaluation of the Social and Economic Costs of Hearing Impairment", October 2006, Hear-it AISBL).

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен студент при підготовці до заняття.

Яка роль вушних раковин для слуху?	Вушні раковини забезпечують спрямованість слухового сприйняття і локалізацію джерела звуку.
Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході	Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході має місце, якщо довжина хвилі в 4 рази більша довжини зовнішнього слухового проходу.

Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха	Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха полягає в трансформації звукових коливань повітря більшої амплітуди та малої сили в коливання рідини внутрішнього вуха з малою амплітудою та великою силою.
Демпферування у вусі	Демпферування у вусі – це послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності (на рівні больового відчуття).
Що відбувається в кортієвому органі?	В кортієвому органі відбувається перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну.
Яку роль виконує у вусі Євстахієва труба?	Євстахієва труба з'єднує середнє вухо з носоглоткою і служить для вирівнювання тиску по обидві сторони барабанної перетинки.
Аудіометрія	Аудіометрія – це клінічний метод дослідження гостроти слуху пацієнта.
Поріг чутності	Поріг чутності - це мінімальне значення інтенсивності звуку, при якій звук ще сприймається органами слуху.
Аудіограма	Аудіограма – крива, яка з'єднує точки порогу чутності пацієнта на різних частотах.

3.4. Написати в зошиті протокол лабораторної роботи №22

Протокол повинен містити: назву роботи, мету, прилади і матеріали, стислу теоретичну частину, назву завдань, таблиці, формули для розрахунків.

3.6. Завдання для самоконтролю (тести):

1. Якою повинна бути довжина звукової хвилі відносно зовнішнього слухового проходу, щоб в ньому виникав акустичний резонанс?
 - а) довжина хвилі в 4 рази менша за довжину зовнішнього слухового

проходу;

б) довжина звукової хвилі в 4 рази більша за довжину зовнішнього слухового проходу;

в) довжина хвилі дорівнює довжині зовнішнього слухового проходу;

г) всі відповіді правильні.

2. В якому органі відбувається перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну?

а) у зовнішньому вусі;

б) у середньому вусі;

в) в євстахієвій трубці;

г) в органі Корті.

3. Мінімальне значення інтенсивності звуку на різних частотах, при яких людина починає чути звук, називається:

а) порогом слухового відчуття або нижнім порогом;

б) верхнім порогом;

в) порогом больового відчуття;

г) порогом больового відчуття або верхнім порогом чутності.

4. Яким діапазоном частот обмежена область слухового відчуття людини?

а) 0–20000 Гц; б) 16–20000 Гц; в) 200–2000 Гц; г) 1000–3000 Гц.

5. Інтенсивність звуку становить 10^{-8} Вт/м². Чому дорівнює рівень інтенсивності звуку?

а) 70 дБ; б) 40 дБ; в) 80 дБ; г) 60 дБ.

6. Шум в аудиторії має рівень інтенсивності 6 Б. Чому дорівнює інтенсивність цього шуму?

а) 10^{-4} Вт/м²; б) 10^{-6} Вт/м²; в) 10^{-8} Вт/м²; г) 10^{-2} Вт/м².

7. Шум в аудиторії має рівень інтенсивності 6 Б. В скільки разів інтенсивність шуму перевищує порогове значення інтенсивності звуку?

а) 100 000; б) 1000; в) 1 000 000; г) 10.

8. Аудіограма - це графік, що відображає ...

- а) поріг чутності пацієнта для різних тонів;
- б) больовий поріг пацієнта на різних частотах;
- в) залежність інтенсивності звуку від частоти;
- г) залежність рівня інтенсивності звуку від частоти.

9. Суть повітряного методу дослідження гостроти слуху полягає в тому, що звукові коливання передаються до внутрішнього вуха:

- а) через органи зовнішнього та середнього вуха;
- б) через соскоподібний відросток скроневої кістки;
- в) через біологічно-активні точки вушної раковини;
- г) через телефони.

10. Суть кісткового методу дослідження гостроти слуху полягає в тому, що звукові коливання передаються до внутрішнього вуха:

- а) через органи зовнішнього та середнього вуха;
- б) через соскоподібний відросток скроневої кістки;
- в) через біологічно-активні точки вушної раковини;
- г) через телефони.

Правильні відповіді: 1–б; 2–г; 3–а; 4–б; 5–б; 6–б; 7–в; 8–а; 9–а; 10–б.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.- с. 165 - 170.
2. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - Вінниця: Нова книга, 2017, с. 166-174.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. До якого діапазону хвиль відноситься механічна хвиля частотою 500 Гц?

а) ультразвук; б) звук; в) інфразвук.

2. Кількість повних коливань точки за одиницю часу – це:

а) тембр; в) частота;

б) інтенсивність; г) період.

3. За якою формулою обчислюється інтенсивність звуку (E – енергія хвилі; S – площа поверхні, через яку хвиля переносить енергію; Φ – потік енергії; t – час перенесення енергії)?

а) $I = \frac{E}{\Phi \cdot t}$; б) $I = \frac{\Phi}{S \cdot t}$; в) $I = \frac{E}{S}$; г) $I = \frac{E}{S \cdot t}$.

4. Одиниця вимірювання інтенсивності у СІ:

а) Вт; б) Вт/м²; в) фон; г) дБ.

5. Як називається характеристика звуку, в якій вказані частоти та інтенсивності простих тонів, що входять до складу складного звуку?

а) тембр;
б) акустичний тиск;
в) акустичний спектр;
г) графік порогу слухового відчуття.

6. Закон Вебера-Фехнера виражається формулою:

а) $E = k \lg \frac{I}{I_0}$; б) $E = \lg \frac{I_0}{I}$; в) $E = k \lg \frac{I_0}{I}$; г) $E = k \frac{I_0}{I}$

7. Рівень слухового сприйняття над його порогом називається:

а) рівнем гучності; б) тембром; в) висотою; г) силою звуку.

8. Мінімальні значення інтенсивності звуку на різних частотах, при яких у вухах пацієнта виникає відчуття болю, називається:

а) порогом слухового відчуття;

- б) порогом чутності;
- в) нижнім порогом або кривою нульової гучності;
- г) порогом больового відчуття або верхнім порогом чутності.

9. Яким діапазоном частот обмежена область слухового відчуття людини?

- а) 0–20000Гц; б) 16–20000 Гц; в) 200–2000Гц; г) 1000–3000Гц.

10. Інтенсивність звуку становить 10^{-6} Вт/м². Чому дорівнює рівень інтенсивності звуку?

- а) 70дб; б) 40дб; в) 80дб; г) 60дб.

11. Яким координатам відповідає точка порогу слухового відчуття, ордината якої прийнята за нульовий рівень шкали рівнів інтенсивності?

- а) $\nu = 1000$ Гц; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²;
- б) $\nu = 1000$ Гц; $I_0 = 10^{-10}$ Вт/м²;
- в) $\nu = 16$ Гц; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²;
- г) $\nu = 20000$ Гц; $I_0 = 10^{-10}$ Вт/м²

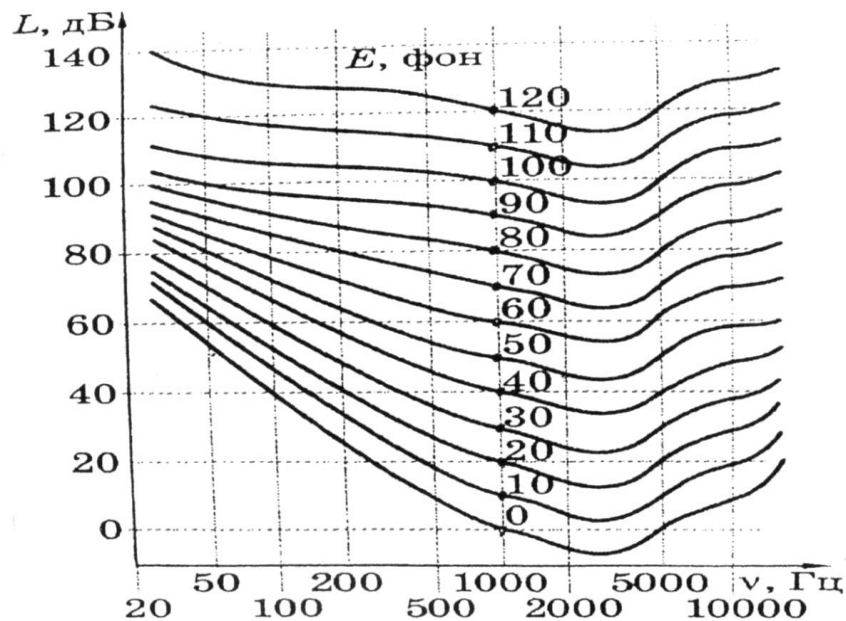
12. Яким координатам відповідає точка порогу больового відчуття, ордината якої прийнята за верхній рівень шкали рівнів інтенсивності?

- а) $\nu = 1000$ Гц; $I_0 = 10$ Вт/м²;
- б) $\nu = 20000$ Гц; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²;
- в) $\nu = 1000$ Гц; $I_0 = 10^{-10}$ Вт/м²;
- г) $\nu = 16$ Гц; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²

13. Яке призначення аудіометра?

- а) дослідження патологічних змін в слуховому апараті;
- б) виявлення дефектів слуху;
- в) визначення чутливості вуха до звуків різних частот;
- г) для визначення верхнього порогу чутності

14. Який рівень гучності відповідає звуку, частота якого 50 Гц, а інтенсивність 10^{-4} Вт/м²?



- а) 10 фон;
- б) 80 фон;
- в) 60 фон;
- г) 50 фон.

15. Від чого залежить чутність звуку?

- а) від частоти коливань;
- б) від частоти звуку;
- в) від частоти та інтенсивності звуку;
- г) від амплітуди коливань.

16. За поріг чутності при частоті 1000 Гц прийнято таку інтенсивність:

- а) 10^{-12} Вт/м²; б) 10^{-10} Вт/м²; в) 10^{-6} Вт/м²; г) 10 Вт/м².

17. За поріг больового відчуття при частоті 1000 Гц прийнято таку

інтенсивність:

- а) 10^{-12} Вт/м²; б) 10^{-10} Вт/м²; в) 10^{-6} Вт/м²; г) 10 Вт/м².

Лабораторна робота №22

ЗНЯТТЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУХА НА ПОРОЗІ ЧУТНОСТІ

Мета роботи:

1. Вивчити будову, принцип дії, призначення аудіометра і порядок роботи з ним.
2. За допомогою аудіометра визначити поріг чутності пацієнта на різних частотах.
3. Побудувати аудіограму та провести її аналіз.

Прилади та матеріали:

1. Клінічний аудіометр Maico MA 790 в комплекті з головними телефонами та кнопкою відповіді пацієнта.
2. Бланк аудіограми.
3. Спирт, вата або марля для промивання амбушюрів.

Опис приладу

В лабораторній роботі використовується клінічний аудіометр Maico MA 790. Зовнішній вигляд передньої панелі якого зображено на рис. 1.

- ♦ **Призначення аудіометра:** визначення порогу чутності обох вух пацієнта на різних частотах у приміщенні з шумоізоляцією.
- ♦ **Будова аудіометра.** Він складається з трьох основних блоків: генератор електричних коливань, телефони і кнопка для фіксації слухового відчуття пацієнта.
- ♦ **Принцип роботи аудіометра.** Генератор аудіометра виробляє електричні коливання таких частот: 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 кГц. Він подає їх по чергові на головні телефони пацієнта (спочатку на синій, а потім на червоний) у вигляді серії із трьох коротких імпульсів. Головні телефони перетворюють електричні коливання у прості тони певного рівня інтенсивності.

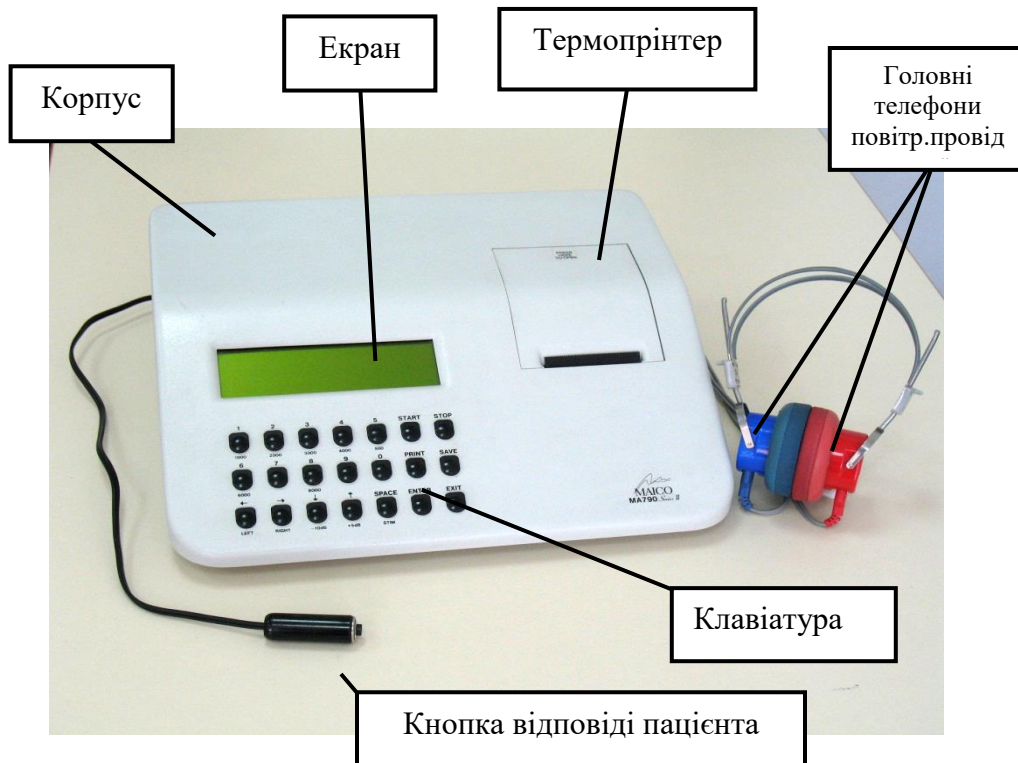


Рис. 1

♦ Особливості експлуатації аудіометра:

- При обстеженні надіти пацієнту головні телефони повітряної провідності на вуха: синій прикласти до лівого вуха, а червоний – до правого.
- Пацієнт відразу натискає кнопку відповіді кожен раз, як почує звук (і не натискує, коли не чує звук). Далі через випадковий проміжок часу (від 2 до 4с) прилад автоматично повторить цей самий простий тон, змінивши рівень інтенсивності (або на -10дБ, або на +5дБ). Коли аудіометр отримає декілька чітких відповідей на одному рівні інтенсивності, тоді він автоматично перейде до іншої частоти.
- Якщо пацієнт по якійсь причині відповідатиме з помилками (наприклад, невпопад натискатиме кнопку відповіді кілька разів при рівні інтенсивності звуку 10дБ і не відповідатиме на сигнали рівнем інтенсивності $\geq 15\text{дБ}$), то прилад включить для лікаря звуковий сигнал тривоги і видасть на екран відповідне повідомлення. Лікар відключить цей сигнал тривоги, повторно проінструктує пацієнта і продовжить випробовування.

- Для одного вуха можуть використовуватися прості тони з рівнем інтенсивності від 0 до 95 дБ (з кроком 5дБ). При цьому аудіометр повторить перевірку гостроти слуху для кожного вуха на зазначених вище частотах. Після того, як вимірювання порогу чутності в автоматичному режимі буде проведено повністю для обох вух, прилад включить для лікаря звуковий сигнал і видасть на екран повідомлення про завершення тестування.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Вивчення призначення аудіометра, його будови та особливостей експлуатації за інструкцією.

Завдання 2. Визначення порогу чутності обох вух пацієнта.

1. Увімкнути аудіометр (спочатку вставити шнур живлення в розетку ~220В, а потім клавішу вмикання напруги перевести в положення 1).
2. Встановити режим аудіометрії, клацнувши клавішу ENTER.
3. За допомогою цифрової клавіатури ввести номер історії хвороби та клацнути клавішу ENTER.
4. Дезинфікувати поверхню гумових амбушюрів, обтираючи їх ватою, змоченою спиртом.
5. Надіти пацієнту головні телефони повітряної провідності на вуха так, щоб синій був зліва, а червоний – справа.
6. Дати пацієнту в ліву руку кнопку відповіді.
7. Вказівним пальцем правої руки один раз клацнути клавішу START.
8. Пацієнт повинен відразу один раз **натиснути і відпустити** кнопку відповіді, коли почує звук у вигляді серії трьох імпульсів.

Примітка 1: прилад автоматично (через кожні 2-4 секунди) буде повторювати ці звуки, змінивши їх інтенсивність або частоту. Так буде тривати до кінця тестування.

9. Коли визначення порогу чутності обох вух пацієнта в автоматичному режимі буде завершено, прилад включить для лікаря звуковий сигнал і видасть на екран повідомлення про завершення тестування «Automatic test complete», тоді

необхідно клацнути клавішу STOP. При цьому на екрані появляться результати тестування.

10. Надрукувати результати дослідження (якщо є папір в термопрінтері), клацнувши один раз клавішу PRINT. В протилежному випадку сфотографувати результати дослідження на екрані і переписати їх в таблицю 1.
11. Якщо потрібно провести дослідження для наступного пацієнта, то клацнути один раз клавішу EXIT і виконати пункти 2 – 10 цього завдання.
12. Після завершення дослідження останній студент повинен два рази клацнути клавішу EXIT і вимкнути аудіометр.

Таблиця 1

Частота, Гц	500	1000	2000	3000	4000	6000	8000
Пониження слуху лівого вуха, дБ							
Пониження слуху правого вуха, дБ							

13. За результатами таблиці 1 побудувати аудіограму лівого і правого вуха на бланку аудіограми. Показники лівого вуха позначаються синім кольором, правого — червоним.
14. Бланк аудіограми вклеїти в протокол.
15. Провести аналіз одержаної аудіограми:
 - а) вказати у протоколі для кожного вуха частоти, на яких чутливість вуха максимальна та мінімальна.
 - б) порівняти аудіограму пацієнта з даними таблиці 2 (див. с. 40) і зробити висновок про стан слуху пацієнта.

Примітка: ♦ Гострота слуху пацієнта відповідає тій ступені втрати слуху (таблиця 2), в діапазоні рівнів інтенсивності якої знаходиться його аудіограма.

♦ Якщо більше точок аудіограми знаходиться в одному діапазоні, а менше – у другому, то гострота слуху пацієнта відповідає назві того діапазону, де знаходиться більше точок його аудіограми.

Тема: ВИВЧЕННЯ МЕТОДУ ІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЕХОЛОКАЦІЇ

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Усім відомо, наскільки важливо перед початком лікування точно визначити діагноз, а не діяти всліпу. Тільки такий підхід може гарантувати ефективність лікування. Сам по собі лікар може судити про стан пацієнта тільки на підставі зовнішніх ознак, які доступні його органам чуття (загальний вигляд, характер кашлю та ін.). Біля 30% діагнозів (таких, наприклад, як ГРВІ, ангіна, грип і т.п.) лікар ставить на підставі зовнішніх ознак та лабораторних досліджень. Для постановки решти діагнозів потрібна додаткова інформація. Щоб її отримати, треба використовувати відповідні медичні прилади і апарати. За даними ВООЗ, більше 70% діагнозів у медицині встановлюється за допомогою так званих променевих методів дослідження (ультразвук, рентгенівське випромінювання, іонізуюче випромінювання, теплове випромінювання).

Серед усіх променевих методів дослідження ультразвук займає особливе місце. За сукупністю позитивних характеристик з ультразвуковим дослідженням важко порівняти який-небудь інший метод, оскільки, жоден не має такого поєднання переваг:

- УЗІ дає достовірну інформацію про положення, форму і розміри внутрішніх органів;
- дослідження зручне, загальнодоступне і не вимагає складної підготовки;
- ультразвук практично нешкідливий і безпечний для лікаря і пацієнта;
- дослідження безболісне і не пов'язане з неприємними відчуттями;
- невеликі витрати часу на проведення дослідження;
- УЗ-дослідження проводиться в режимі реального часу.

В сучасних медичних дослідженнях одним із методів діагностики є метод ультразвукової ехолокації. Він дозволяє: виявляти пухлини, камені в печінці або в

нирках; досліджувати склад конгломератів в скловидному тілі ока, відшарування сітківки; визначати форму різних органів тощо.

Метод ультразвукової ехолокації, який застосовують у невропатології та нейрохірургії, має назву – *ехоенцефалографія*. Він дає можливість раннього вияву внутрішньочерепних крововиливів, абсцесів, рецидивів пухлинних захворювань мозку та інших. Ехоенцефалографія дає можливість контролювати результати внутрічерепних операцій, діагностувати такі грізні післяопераційні ускладнення як внутрічерепна гематома, набряк мозку та ін.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- фізичні характеристики ультразвуку та особливості його поширення;
- фізичні основи функціонування джерел та приймачів ультразвуку;
- закони відбивання, заломлення та поглинання ультразвуку;
- на рівні блок-схеми будову ехолокатора і призначення кожного блоку;
- принципи ехолокації та трансмісії як ультразвукових методів дослідження у клініці;
- основні характеристики ехолокатора: роздільна здатність, межа роздільності, максимальна глибина зондування (межа проникнення), мертва зона;
- сфери використання методу ехолокації в медицині.

Вміти:

- демонструвати навички роботи з ехолокатором;
- отримувати на екрані ехо-сигнали відбиваючих структур;
- визначати границю роздільності ехоенцефалоскопа;
- визначати коефіцієнт поглинання досліджуваного об'єкта;
- визначати геометричні розміри і локалізацію досліджуваного об'єкта.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Ультразвук (УЗ). Фізичні характеристики УЗ.
2. Джерела та приймачі УЗ. Явища, що лежать в основі функціонування джерел та приймачів УЗ (магнітострикція, прямий та обернений п'єзоефекти).
3. Основні властивості УЗ хвиль.
4. Особливості поширення УЗ хвиль в середовищі.
 - 4.1. Відбивання та заломлення УЗ на межі поділу двох середовищ.
Коефіцієнти відбивання і пропускання.
 - 4.2. Поглинання УЗ речовиною. Закон ослаблення інтенсивності УЗ в однорідному середовищі. Коефіцієнт поглинання.
5. Будова ехоенцефалоскопа (ехолокатора). Ехолокаційний та трансмісійний режими роботи ехолокатора.
6. Роздільна здатність, межа роздільності, максимальна глибина зондування, мертва зона ехолокатора.
7. Використання методу ультразвукової ехолокації в медицині.

3.2. Зміст теми

1. Ультразвук (УЗ). Фізичні характеристики УЗ

Ультразвук – це механічні хвилі з частотою більше 20000Гц.

Ультразвукові хвилі – повздовжні хвилі, які являють собою періодичне чередування зон стиснення і розрідження частинок середовища (рис. 1).

Основні характеристики УЗ:

- **Частота** (ν) – число повних коливань певної точки хвилі за одиницю часу.
- **Період** (T) – час одного повного коливання. Період обернено пропорційний

частоті: $T=1/\nu$.

- **Амплітуда** (A) – найбільше зміщення певної точки хвилі відносно положення рівноваги.
- **Довжина хвилі** (λ) – відстань між найближчими точками, що коливаються в однакових фазах (або відстань, на яку поширюється хвиля за один період: $\lambda = \nu \cdot T$).
- **Швидкість поширення хвилі** – відстань, на яку поширюється хвиля, за одиницю часу ($\nu = \lambda / T = \lambda \cdot \nu$).
- **Інтенсивність** (I) чисельно дорівнює енергії, яку переносить хвиля через одиницю площі поверхні за одиницю часу в перпендикулярному до поверхні напрямку:

$$I = \frac{E}{S \cdot t} \quad [I] = 1 \frac{Вт}{м^2}$$

Інтенсивність УЗ залежить від квадрату частоти ν коливань, квадрату амплітуди A коливань частинок, густини ρ середовища і швидкості ν поширення хвилі:

$$I = 2\pi^2 \nu^2 A^2 \cdot \rho \cdot \nu, \quad (1)$$

- **Акустичний тиск** – це додатковий тиск ΔP (надлишковий над середнім тиском), що утворюється в ділянках згущення частинок середовища при проходженні через нього УЗ хвилі (рис.1). Для плоскої гармонічної хвилі акустичний тиск ΔP зв'язаний з інтенсивністю I ультразвуку співвідношенням:

$$I = \frac{(\Delta P)^2}{\rho \cdot \nu}$$

де ρ – густина середовища; ν – швидкість ультразвуку;
 $\rho \cdot \nu$ – акустичний опір середовища.

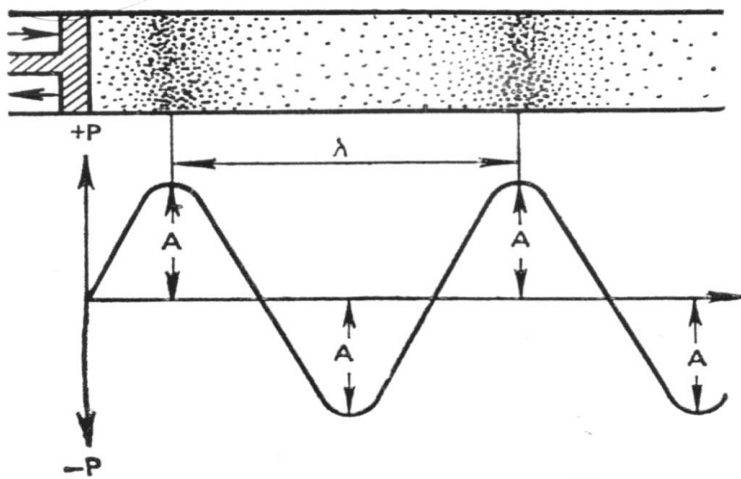


Рис.1

2. Джерела та приймачі УЗ. Явища, що лежать в основі функціонування джерел та приймачів УЗ (магнітострикція, прямий та обернений п'єзоєфекти).

♦ Джерела УЗ:

На практиці ультразвук найчастіше одержують за допомогою магнітострикційних і п'єзоелектричних випромінювачів.

- **Магнітострикційний випромінювач** перетворює енергію змінного магнітного поля в енергію механічних коливань і використовується для отримання низькочастотних ультразвуків (до 200 кГц). Їх дія ґрунтується на явищі магнітострикції.

Явище *магнітострикції* - це деформація (зміна об'єму і лінійних розмірів) феромагнетика під впливом змінного магнітного поля.

Якщо стержень з феромагнетика (залізо, нікель, залізо-нікелевий сплав або ферити) помістити в змінне магнітне поле соленоїда (рис. 2), то він, у відповідності з частотою зміни напрямку магнітного поля, буде періодично змінювати свою довжину (скорочуватися або видовжуватися), тобто відбуватимуться вимушені механічні коливання. Кінці стержня будуть випромінювати в середовище ультразвукові коливання.

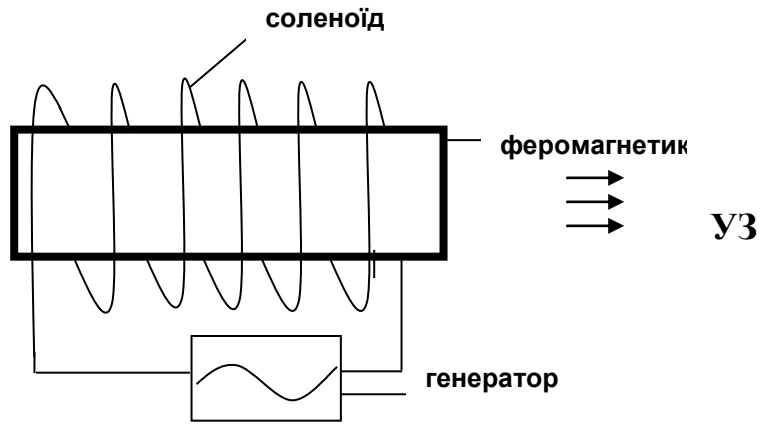


Рис.2.

• **П'єзоелектричний випромінювач** використовується для генерації ультразвуку з частотою більшою 200 кГц. Їх дія ґрунтується на явищі оберненого п'єзоелектричного ефекту.

Явище *оберненого п'єзоелектричного ефекту* - це зміна лінійних розмірів кристалу п'єзоелектрика під дією змінного електричного поля, тобто відбуваються вимушені механічні коливання п'єзоелектрика.

П'єзоефект спостерігається в кварці (SiO_2), титанаті барію (BaTiO_3), сегнетовій солі, турмаліні та в інших речовинах, об'єднаних спільною назвою «п'єзоелектрики». Для створення оберненого п'єзоефекту на грані кристала накладають електроди, на які подають напругу від генератора УВЧ електромагнітних коливань з частотою $\nu > 20000\text{Гц}$ (рис. 3). При змінній напрузі на електродах в кристалі виникають механічні коливання (інтенсивність яких залежить від частоти напруги), які, поширюючись в середовищі, утворюватимуть УЗ хвилю.

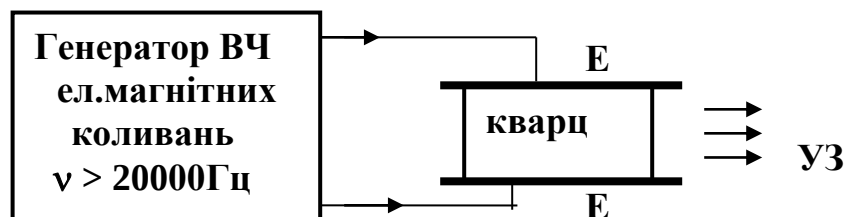


Рис. 3.

♦ Приймачі УЗ:

В приймачах УЗ використовується явище прямого п'єзоефекту.

Явище *прямого п'єзоефекту* – це поляризація п'єзокристала (кварц, титан та ін.) при його механічній деформації.

Отже, при деформації (стисканні, згинанні) кристала (наприклад, кварцу) на його гранях з'являються електричні заряди. Величина цих зарядів прямо пропорційна до прикладеної сили. Зміна напрямку дії сили зумовлює зміну знаку електричних зарядів на поверхні кварцу, до яких щільно прилягають електроди (рис. 4). Слабкі електричні сигнали, які появились на електродах, підсилюються і подаються на реєструючий пристрій.

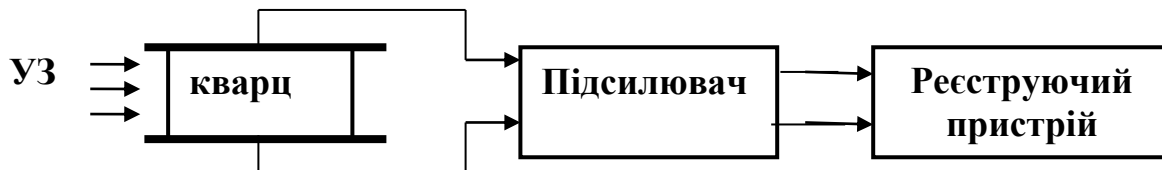


Рис. 4.

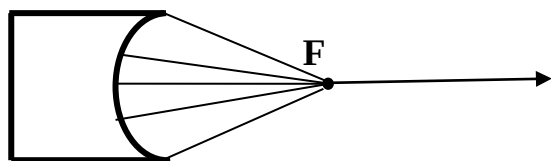
3. Основні властивості УЗ хвиль

- *Променевий характер* розповсюдження ультразвуку.
- Довжина хвилі УЗ менша, ніж довжина хвилі звуку.

Наприклад:

Механічні хвилі	Частота	Довжина хвилі
Звук	$\nu = 1 \text{ кГц}$	$\lambda = 1,4 \text{ м}$
УЗ	$\nu = 1 \text{ МГц}$	$\lambda = 1,4 \text{ мм}$

- Велике прискорення частинок середовища при утворенні УЗ хвилі.
- Ультразвукова хвиля добре фокусується (рис. 5), оскільки має малу довжину хвилі. Це дає можливість отримувати УЗ великої інтенсивності $I = 3 \dots 5 \text{ Вт/см}^2$ (ультразвуковий скальпель).



$$\uparrow I = \frac{E}{\downarrow S \cdot t}$$

УЗ випромінювач

Рис. 5

- **Швидкість УЗ** залежить від густини і пружних властивостей середовища. Найбільша швидкість звуку в твердих тілах, дещо менша в рідинах, а найменша в газах. *Наприклад:*

Речовина	Швидкість (v), м/с
Повітря	330
Вода	1497
Жир	1467
М'які тканини	1540
Кістки	3335

Знаючи швидкість ультразвуку в біотканині, можна оцінити її функціональний стан. Отже, швидкість ультразвуку в біотканині - діагностичний тест.

Наприклад:

Велика стегнова кістка	Швидкість УЗ (v), м/с
Здорова	1450
100 днів після перелому	1280

4. Особливості поширення УЗ в середовищі

Особливості поширення УЗ в середовищі обумовлені його високою частотою і, відповідно, малою довжиною хвилі.

- ♦ **Відбивання і заломлення УЗ** на межі поділу двох середовищ.

Закони відбивання і заломлення ультразвукової хвилі аналогічні законам відбивання і заломлення світла.

Нехай ультразвукова хвиля падає на межу поділу цих двох середовищ під кутом α . Інтенсивність падаючої хвилі $I_{пад}$, інтенсивність відбитої хвилі $I_{в}$, а інтенсивність хвилі, яка перейшла в друге середовище, $I_{пр}$.

Величину $K_{в} = \frac{I_{в}}{I_{пад}}$ називають **коефіцієнтом відбивання** УЗ хвилі, а

величину $K_{пр} = \frac{I_{пр}}{I_{пад}}$ називають **коефіцієнтом пропускання** УЗ хвилі.

Ці коефіцієнти залежать від співвідношення акустичних опорів ($Z = \rho \cdot v$) двох середовищ, які межують між собою. Чим більша різниця акустичних опорів середовищ, тим більше відбивання і менше заломлення. *Наприклад: УЗ добре відбивається від надокістя, кісток, порожнинних органів та ін.*

- Таким чином, на межі поділу двох середовищ відбувається перерозподіл механічної енергії ультразвуку в залежності від акустичної густини середовищ, що лежить в основі ультразвукових методів дослідження у клініці.
- Основний принцип роботи будь-якого ультразвукового діагностичного приладу полягає у реєстрації відповідними способами відбитих від неоднорідностей внутрішніх органів і тканин організму УЗ променів.

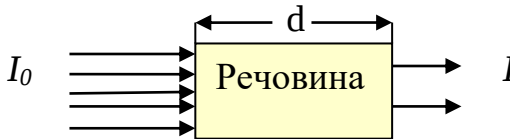
Примітка:

1. Оскільки коефіцієнт відбивання УЗ на межі розділу повітря-об'єкт найбільший, тому між джерелом УЗ і об'єктом опромінення не повинно бути повітря. Для цього використовують спеціальні гелі, гліцерин, вазелін, воду.
2. При використанні методики ультразвукової діагностики шлунково-кишкового тракту пацієнт за 12 годин до обстеження не повинен їсти, щоб не утворювалися гази, в яких ультразвукові хвилі згасають. *(Примітка: на межі поділу об'єкт-повітря коефіцієнт відбивання найменший, а, відповідно, коефіцієнт пропускання УЗ найбільший).*

♦ **Поглинання УЗ середовищем** – це явище перетворення УЗ енергії в інші види енергії, наприклад, в тепло. Отже, ультразвукова хвиля при поширенні в пружному середовищі зменшує свою інтенсивність, оскільки середовище поглинає енергію УЗ.

Запишемо закон послаблення інтенсивності ультразвуку середовищем:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$



де I_0 – інтенсивність ультразвуку, який падає на речовину;

I - інтенсивність ультразвуку, який вийшов з речовини;

d - товщина шару речовини;

μ – коефіцієнт поглинання УЗ речовиною.

Фізичний зміст коефіцієнта поглинання: коефіцієнт поглинання обернено пропорційний товщині шару речовини ($\mu = \frac{1}{d}$), на якій інтенсивність ультразвуку зменшується в $e = 2,7$ раз, тобто:

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-\frac{1}{d} \cdot d} = I_0 e^{-1} = \frac{I_0}{e}$$

Наприклад: Коефіцієнт поглинання ультразвуку водою дорівнює: $\mu = 0,001 \text{ см}^{-1}$.

Який фізичний зміст цієї величини?

Відповідь: Коефіцієнт поглинання ультразвуку $\mu = 0,001 \text{ см}^{-1}$ обернено пропорційний шару води товщиною $d = 1/0,001 = 1000 \text{ см}$, на якому інтенсивність ультразвуку зменшується в $e = 2,7$ раз.

Коефіцієнт поглинання (μ) залежить:

від частоти ультразвуку: $\mu = a\omega^2$, де a – коефіцієнт пропорційності.
Наприклад, ультразвук великої частоти поглинається сильніше, ніж малої частоти.

від властивостей середовища (густини, в'язкості та ін.).
Чим більша густина речовини, тим більший коефіцієнт поглинання (див. таблицю 1).

від функціонального стану органу (кровообігу, лімфотоку, скорочення, розслаблення, збудження, гальмування та ін.).

Таблиця 1.

Біотканина	μ (см ⁻¹)
Вода	0,001
Жир	0,045
Печінка	0,150
М'язи	0,150
Кістки	0,710

Знаючи коефіцієнт поглинання ультразвуку в біотканині, можна оцінити її стан. Отже, коефіцієнт поглинання ультразвуку в біотканині - діагностичний тест.

Наприклад:

- при жировому переродженні печінки коефіцієнт поглинання μ зменшується;
- запальний процес в біотканині супроводжується набряком, тому коефіцієнт поглинання μ – зменшується;
- якщо в тканині атрофія, склерозування, онкологія, то μ – збільшується.

4. Будова ехоенцефалоскопа (ехолокатора). Ехолокаційний та трансмісійний режими роботи ехолокатора

На рис. 6 зображено блок-схему ехоенцефалоскопа ЕЕС-11, який складається з задаючого генератора, двох п'єзоелектричних датчиків (зондів) Z_1 і Z_2 , перемикача П режимів (Е – ехолокація і Т – трансмісія), приймача (підсилювача електричних сигналів), індикатора ЕПТ (електронно-променева трубка), блоків розгортки і синхронізатора.

Методи ехолокації і трансмісії базуються на фізичних законах відбивання, заломлення і поглинання ультразвуку.

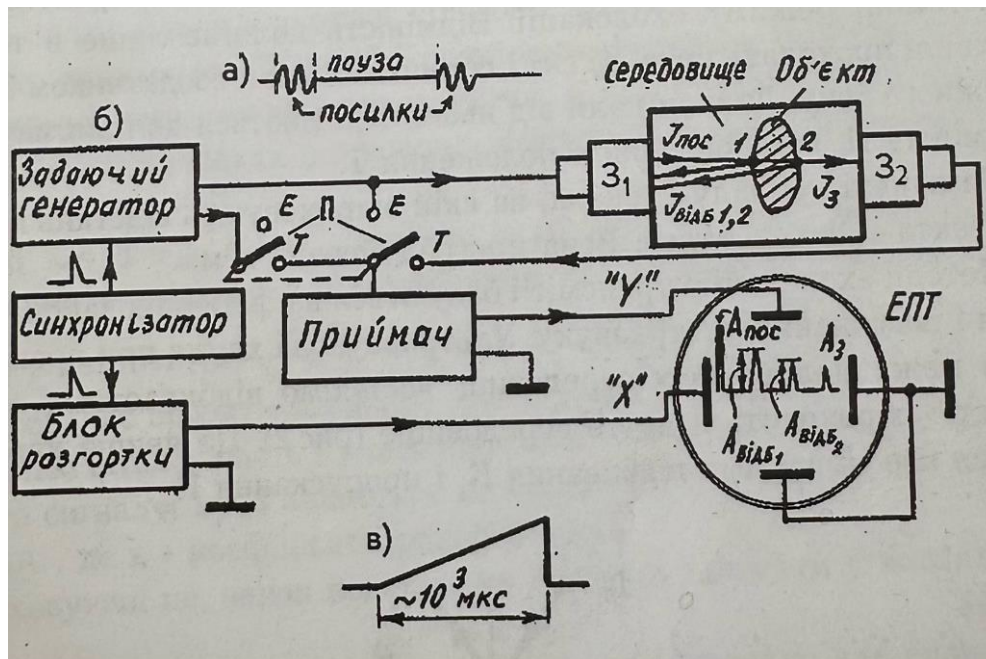


Рис.6

Розглянемо роботу ехолокатора в режимі ехолокації. При цьому перемикач П встановлений в положення Е (режим ехолокації). Синхронізатор створює короткочасні імпульси, які синхронно запускають блок розгортки і задаючий генератор. Останній генерує 5-7 синусоїдальних електричних коливань з частотою 1,76 МГц, які називаються посилка (рис. 6а). Вони подаються на вхід приймача і зонда Z_1 . Імпульси з виходу приймача і блоку розгортки одночасно подаються, відповідно, на входи «У» і «Х» ЕПТ. Перший сигнал короткочасно відхиляє

електронний промінь по вертикалі, а другий – рівномірно зміщує його по горизонталі. На екрані ЕПТ з'являється зображення сигналу посилки. В цей час п'єзодатчик Z_1 перетворює електричну посилку в ультразвук (такої ж частоти), який під час паузи розповсюджується в пружному середовищі.

Зустрічаючи на своєму шляху досліджуваний об'єкт, ультразвукова хвиля частково відбивається від передньої поверхні досліджуваного об'єкта, потім від задньої. Утворені таким чином ехо-сигнали повертаються до п'єзодатчика Z_1 , де вони перетворюються у відповідні електричні сигнали (прямий п'єзоефект) і потрапляють на приймач, в якому підсилюються і дають на екрані ЕПТ гострокінцеві імпульси A_1 і A_2 , які є зображенням ехо-сигналів.

Принцип дії ехолокатора в режимі трансмісії дещо аналогічний режиму ехолокації. Відмінність полягає лише в тому, що ультразвукові хвилі проходять крізь об'єкт і сприймаються п'єзодатчиком Z_2 з протилежного боку. Потім електричні сигнали від зонда Z_2 передаються до приймача через перемикач П, встановлений в положення Т (режим трансмісії).

На передній панелі приладу є шкала (проградуєвана в мм), за допомогою якої визначають відстань від зонда до об'єкта і його деталей, тобто визначають розміри і місцезнаходження об'єкта.

6. Роздільна здатність і межа роздільності ехолокатора.

Якість і точність формування ехозображень визначаються роздільною здатністю ехолокатора. **Роздільна здатність ехолокатора** – це здатність ехолокатора показувати роздільно два окремі ехо-сигнали, отримані від двох відбиваючих структур.

Кількісною характеристикою якості і точності ехозображень є межа роздільності. **Межа роздільності ехолокатора** – це мінімальна відстань між

двома відбиваючими структурами, від яких можливо зареєструвати роздільно два окремі ехо-сигнали. Межа роздільності Δl визначається за формулою:

$$\Delta l = \frac{1}{2} \lambda n$$

де λ - довжина ультразвукової хвилі, n – число хвиль в посилю.

Довжина хвилі λ пов'язана з частотою ν і швидкістю v співвідношенням:

$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

з якого видно, що зі збільшенням частоти коливань довжина ультразвукової хвилі зменшується, відповідно, зменшується межа роздільності ехолатора (рис.7)

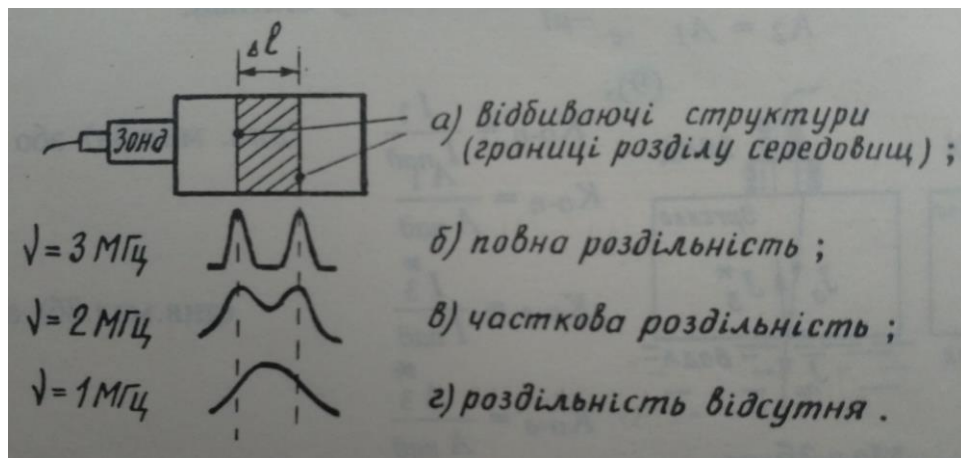


Рис.7

Максимальна глибина зондування – це найбільша відстань до відбиваючої поверхні, сигнал від якої ще може бути зареєстрований.

Мертва зона – це ділянка (відстань) поблизу датчика, в межах якої неможливо зареєструвати відбиті сигнали.

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Ультразвук	Ультразвук – це механічні хвилі з частотою більше 20000 Гц.
-------------------	--

Інтенсивність	Інтенсивність (I) чисельно дорівнює енергії E, яку переносить хвиля через одиницю площі S поверхні за одиницю часу t в перпендикулярному до поверхні напрямку: $I = \frac{E}{S \cdot t} \quad [I] = 1 \frac{Bm}{m^2}$
Магнітострикція	Магнітострикція - це зміна лінійних розмірів (розтяг або стиснення) феромагнетика під дією змінного магнітного поля.
Обернений п'єзоелектричний ефект	Обернений п'єзоелектричний ефект – це зміна лінійних розмірів п'єзоелектрика (кварц) під дією змінного електричного поля.
Прямий п'єзоелектричний ефект	Прямий п'єзоелектричний ефект – це виникнення на певних гранях п'єзоелектрика зарядів з протилежними знаками під час його механічної деформації.
Роздільна здатність ехолокатора	Роздільна здатність ехолокатора – це здатність ехолокатора показувати роздільно два окремі ехо-сигнали, отримані від двох відбиваючих структур.
Межа роздільності ехолокатора	Межа роздільності ехолокатора – це мінімальна відстань між двома відбиваючими структурами, від яких можливо зареєструвати роздільно два окремі ехо-сигнали.
Максимальна глибина зондування	Максимальна глибина зондування – це найбільша відстань до відбиваючої поверхні, сигнал від якої ще може бути зареєстрований.
Мертва зона	Мертва зона – це ділянка (відстань) поблизу датчика, в межах якої неможливо зареєструвати відбиті сигнали.

3.4. Написати в зошиті протокол лабораторної роботи №23

Протокол повинен містити: назву роботи, мету, прилади і матеріали, стислу теоретичну частину, назву завдань, таблиці, формули для розрахунків.

3.6. Завдання для самоконтролю (тести):

1. Ультразвукові хвилі – це механічні хвилі з частотою:
 - а) нижче 16Гц;
 - б) у межах 16-20000Гц;
 - в) від 20 Гц до 20кГц;
 - г) вище 20000Гц.
2. Променевий характер розповсюдження УЗ зв'язаний з:
 - а) великою інтенсивністю УЗ;
 - б) малою довжиною хвилі УЗ;
 - в) сильним поглинанням його у газових середовищах.
 - г) великою довжиною хвилі УЗ.
3. За якою формулою обчислюється інтенсивність ультразвуку (Е – енергія хвилі; S – площа поверхні, через яку хвиля переносить енергію; Φ – потік енергії; t – час перенесення енергії)?
 - а) $I = \frac{E}{\Phi \cdot t}$;
 - б) $I = \frac{E}{S \cdot t}$;
 - в) $I = \frac{E}{S}$;
 - г) $I = \frac{\Phi}{S \cdot t}$.
4. Яка фізична природа ультразвуку?
 - а) поздовжня механічна хвиля;
 - б) поперечна механічна хвиля;
 - в) електромагнітна поздовжня хвиля;
 - г) потік квантів енергії, що розповсюджується від джерела.
5. При збільшенні частоти ультразвукових коливань в 2 рази (при незмінних інших параметрах) інтенсивність коливань збільшиться в ...

а) 2 рази; б) 9 разів; в) 4 рази; г) 16 раз.

6. Ультразвук відрізняється від звуку тим, що у нього:

- а) більша частота;
- б) менша довжина хвилі;
- в) не сприймається людським органом слуху;
- г) всі відповіді вірні.

7. Коефіцієнт відбивання УЗ становить: $K_B=0,20$. Що це означає?

- а) інтенсивність падаючих УЗ хвиль складає 80%, а відбитих – 20%;
- б) інтенсивність відбитих УЗ хвиль становить $1/5$ частину від інтенсивності падаючих УЗ хвиль;
- в) інтенсивність падаючих УЗ хвиль складає 80%, а тих, що перейшли в друге середовище – 20%.

8. Коефіцієнт заломлення УЗ становить: $K_3=0,25$. Що це означає?

- а) інтенсивність падаючих УЗ хвиль складає 75%, а заломлених – 25%;
- б) інтенсивність відбитих УЗ хвиль складає 75%, а падаючих – 25%;
- в) інтенсивність заломленого УЗ променя становить $1/4$ частину від інтенсивності падаючого.

9. Коефіцієнт поглинання УЗ розчином NaCl дорівнює: $0,01 \text{ см}^{-1}$.

Це означає, що шар розчину NaCl:

- а) має товщину 100см і через нього проходить УЗ;
- б) товщиною 0,01см зменшує інтенсивність УЗ в e раз;
- в) товщиною 0,01см зменшує інтенсивність УЗ в 2,7 раз;
- г) товщиною 100см зменшує інтенсивність УЗ в 2,7 раз.

10. Виникнення на певних гранях п'єзокристала (кварцу) зарядів з

протилежними знаками під час його механічної деформації називається:

- а) прямим п'єзоефектом;
- б) оберненим п'єзоефектом;

- в) магнітострикцією;
- г) намагнічуванням.

Правильні відповіді: 1–г; 2–б; 3–б; 4–а; 5–в; 6–г; 7–б; 8–в; 9–г; 10–а.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.- с. 165 - 174.
2. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - Вінниця: Нова книга, 2017, с. 166-174.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. До якого діапазону хвиль відноситься механічна хвиля частотою 50000 Гц?
а) ультразвук; б) звук; в) інфразвук.
2. Променевий характер розповсюдження УЗ зв'язаний з:
а) великою інтенсивністю УЗ;
б) малою довжиною хвилі УЗ;
в) сильним поглинанням його у газових середовищах;
г) великою довжиною хвилі УЗ.
3. Число повних коливань частинки середовища за одиницю часу називається:
а) періодом; б) частотою; в) герцом.
4. Відстань, на яку поширюється УЗ хвиля за одиницю часу, називається:
а) швидкістю; б) шляхом; в) частотою.
5. Явище зміни лінійних розмірів (розтяг або стиснення) феромагнетику під дією змінного магнітного поля називається:
а) магнітострикцією;
б) прямим п'єзоефектом;
в) оберненим п'єзоефектом;

г) поляризацією.

6. Явище зміни лінійних розмірів (розтяг або стиснення) п'єзокристала під дією змінного електричного поля називається:

- а) прямим п'єзоефектом;
- б) магнітострикцією;
- в) оберненим п'єзоефектом;
- г) поляризацією.

7. Явище виникнення на певних гранях п'єзокристала (кварцу) зарядів з протилежними знаками під час його механічної деформації називається:

- а) прямим п'єзоефектом;
- б) оберненим п'єзоефектом;
- в) магнітострикцією;
- г) намагнічуванням.

8. Що буде відбуватися в кварці, якщо на нього подіяти ультразвуком?

- а) магнітострикція;
- б) стане джерелом УЗ;
- в) обернений п'єзоефект;
- г) поляризація кварцу в результаті його механічної деформації.

9. Інтенсивність відбитого УЗ променя становить $1,6 \frac{Bm}{m^2}$. Коефіцієнт відбивання – 0,4. Чому дорівнює інтенсивність падаючого УЗ променя?

- а) $0,64 \frac{Bm}{m^2}$;
- б) $4,0 \frac{Bm}{m^2}$;
- в) $0,25 \frac{Bm}{m^2}$.

10. Які основні властивості УЗ хвиль?

- а) променевий характер розповсюдження;
- б) можливість досягнення великих значень інтенсивності;
- в) ультразвукова хвиля добре фокусується;
- г) всі відповіді вірні.

11. Які фізичні основи ехолокаційного УЗ методу діагностики органів?
- а) відбивання УЗ від границі розділу 2-х середовищ;
 - б) поглинання УЗ;
 - в) заломлення УЗ на границі розділу 2-х середовищ;
 - г) дифракції УЗ.
12. Якщо зменшити частоту ультразвуку в два рази (за незмінних інших параметрах), то інтенсивність:
- а) збільшиться в два рази;
 - б) збільшиться в чотири рази;
 - в) зменшиться в два рази;
 - г) зменшиться в чотири рази.
13. Найсильніше поглинає ультразвук:
- а) м'язова тканина і кров;
 - б) жирова тканина;
 - в) кісткова тканина;
 - г) повітря в легенях.
14. В ультразвуковій діагностиці застосовують ультразвук частотою:
- а) 80 – 100 кГц; б) 80 – 100 МГц; в) 100 – 100 кГц; г) 0,5 - 15 МГц.
15. У фізіотерапії застосовують ультразвук частотою:
- а) 800 – 3000 кГц; б) 80 – 100 МГц; в) 100 – 100 кГц; г) 0,5 - 15 МГц.
16. При ультразвуковій діагностиці необхідно уникати повітряного прошарку між джерелом ультразвуку (зондом) і ділянкою тіла, що опромінюється, оскільки шар повітря:
- а) має найбільший коефіцієнт поглинання;
 - б) підсилює інтенсивність УЗ;
 - в) прогрівається до високих температур;
 - г) відбиває УЗ, тому він не поступає в опромінювану тканину.

Лабораторна робота №23

ВИВЧЕННЯ МЕТОДУ ІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЕХОЛОКАЦІЇ

Мета роботи:

1. Вивчити будову, принцип дії і призначення ехоенцефалоскопа.
2. Визначити межу роздільності ехоенцефалоскопа, геометрію і локалізацію досліджуваного об'єкта.
3. Визначити коефіцієнти поглинання, відбивання і пропускання ультразвуку.

Прилади та матеріали:

1. Ехоенцефалоскоп ЕЕС-11.
2. Посудина з водою.
3. Плексигласовий циліндр.
4. Набір плексигласових пластинок.
5. Об'єкт дослідження.

Опис приладу

В лабораторній роботі використовується клінічний ехоенцефалоскоп ЕЕС-11.

- ♦ **Призначення ехоенцефалоскопа:** отримання інформації про розміщення і характер структур головного мозку та вимірювання їх лінійних розмірів методом ультразвукової локації.
- ♦ **Будова ехоенцефалоскопа.** Він складається із задаючого генератора, двох п'єзоелектричних датчиків (зондів), перемикача П режимів (Е – ехолокація і Т – трансмісія), приймача (підсилювача електричних сигналів), індикатора ЕПТ (електронно-променева трубка), блоків розгортки і синхронізатора.
- ♦ **Принцип роботи ехоенцефалоскопа.** Він працює в двох режимах – ехолокаційному і трансмісійному:
 - в ехолокаційному режимі роботи ультразвукові хвилі, які проходять через середовище, частково відбиваються від досліджуваного об'єкта. При цьому відбиті сигнали поширюються по тому ж шляху, але в зворотному напрямку і приймаються тим же зондом в інтервалах між випромінюваннями.

- в трансмісійному режимі роботи ультразвукові хвилі проходять через досліджуваний об'єкт і приймаються ультразвуковим зондом, який розміщений з протилежної сторони досліджуваного об'єкта.

♦ **Особливості експлуатації ехоенцефалоскопа.** Діагностика за допомогою цього приладу проста, не потребує спеціальної підготовки хворого, безпечна і немає протипоказань.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Підготовка ехоенцефалоскопа до роботи в режимі ультразвукової ехолокації.

- 1.1. Ознайомитись з інструкцією ехоенцефалоскопа (ехолокатора) ЕЕС-11.
- 1.2. Підготувати прилад до роботи:
 - а) Увімкнути ехолокатор.
 - б) Встановити перемикач “Е,Т” режимів роботи приладу в положення “Е” (ехолокація).
 - в) Ручкою “Мощность” увімкнути генератор посилок і встановити мінімальне значення потужності (положення ручки крайнє ліве).

Завдання 2. Знаходження межі роздільності ехолокатора.

- 2.1. Змастити зонд вазеліном або гліцерином і прикласти до посудини з водою так, щоб між ними не було бульбашок повітря.
- 2.2. Плексигласову пластину товщиною 10 мм занурити у посудину з водою на відстані 50-60 мм від зонду і встановити перпендикулярно до напрямку розповсюдження УЗ-хвилі, яку випромінює зонд.
- 2.3. Регулятором “Усиление” встановити режим роботи приймача ехолокатора так, щоб на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) було зображення двох ехо-сигналів: від передньої і задньої поверхонь пластини.
- 2.4. Не змінюючи положення регулятора “Усиление”, виконати аналогічні дослідження для пластинок іншої товщини (5 мм, 3 мм, 2 мм, 1 мм).
- 2.5. Намалювати зображення ехо-сигналів в протоколі для кожної пластинки, відповідно, вказавши товщину пластинок і вид роздільності (повна,

часткова, відсутня).

2.6. Записати висновок про межу роздільності даного ехолокатора.

Завдання 3. Визначення геометрії і локалізації об'єкта в середовищі.

- 3.1. Досліджуваний об'єкт розташувати в посудині з водою так, щоб його вісь обертання була на відстані 50 мм від зонда. Для цього скористатись міліметровою лінійкою, яка розташована на бічній стінці посудини.
- 3.2. Показчик кута повороту об'єкта встановити на значення 0.
- 3.3. Регулятором “Усиление” встановити на екрані ехолокатора максимально можливу амплітуду A_0 імпульсу посилки (рис.2а). Ручкою “Измерение” встановити показчик відстані на початок шкали. При цьому мітка (“V”) на екрані ЕПТ повинна суміститись з імпульсом посилки A_0 (рис.2а).

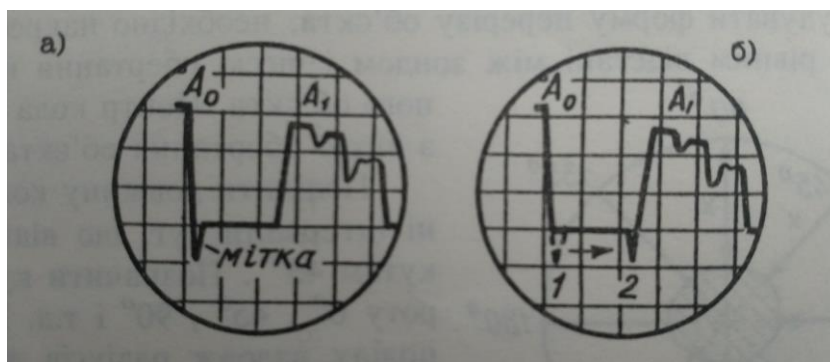


Рис.2

- 3.4. Перемістити мітку до початку першого ехо-сигналу A так, щоб зріз мітки співпадав з фронтом ехо-сигналу. На шкалі, розташованій над ручкою “Измерение”, визначити відстань x від зонду до поверхні об'єкта (відстань 1...2 на рис.2б).
- 3.5. Виконати аналогічні вимірювання відстані від зонду до поверхні досліджуваного об'єкта, повертаючи його кожний раз на 45° . Одержані результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

Кут α	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
x , мм								

- 3.6. За даними таблиці 1 побудувати форму перерізу досліджуваного об'єкта.

Зразок вказаний на рис.3.

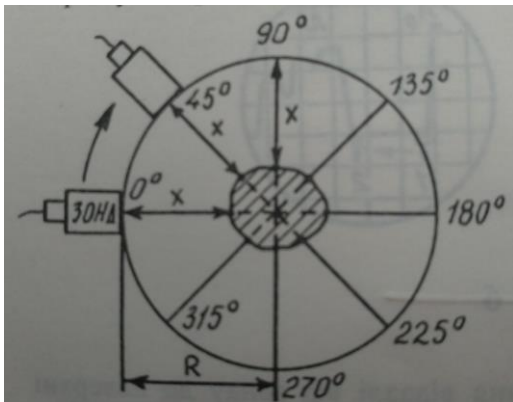


Рис.3

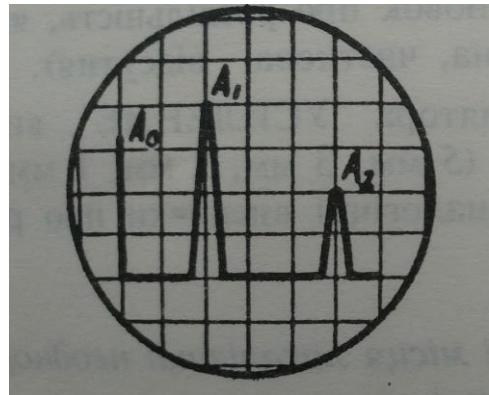


Рис.4

Завдання 4. Визначення коефіцієнту поглинання ультразвуку

- 4.1. Циліндр з плексигласу (товщиною $d=50$ мм) встановити на суху підставку, що створює межу поділу двох середовищ “плексиглас-повітря”. На верхній площині циліндра розташувати зонд Z_1 , попередньо змастивши його поверхню вазеліном або гліцерином .
- 4.2. Регулятором “Усиление” встановити на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) амплітуду A_1 першого ехо-сигналу висотою 40 мм. Потім виміряти амплітуду другого ехо-сигналу A_2 (рис.4). Дані записати таблицю 2.

Таблица 2

$d, \text{мм}$	$A_1, \text{мм}$	$A_2, \text{мм}$	$\mu, \text{мм}^{-1}$

- 4.3. Розрахувати коефіцієнт поглинання ультразвуку плексигласом за формулою:

$$\mu = \frac{1}{2 \cdot d} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2}$$

де d – товщина циліндра ($d=50$ мм).

- 4.4. Зробити висновок про інформативність ехолокаційного методу ультразвукового дослідження.

Тема: ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БІОФІЗИКИ СЛУХУ

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Слухова система забезпечує акустичне спілкування в життєдіяльності людини, зв'язуючи безпосередній приймач звуку з головним мозком. Використовуючи поняття кібернетики, можна сказати, що слухова система приймає, переробляє і передає інформацію – цим забезпечує акустичне спілкування в життєдіяльності людини.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- Основи фізіологічної акустики.

Вміти:

- Трактувати механізм просторової локалізації звуку, акустичний резонанс в структурах вуха, трансформацію звукової хвилі середнім вухом, явище демпферування у вусі, сприйняття звукових частот, перетворення акустичної енергії в електричний сигнал.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Будова вуха та послідовність поширення звуку в ньому.
2. Фізична модель органу слуху.
3. Механізм просторової локалізації звуку.
4. Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході.
5. Узгодження акустичних опорів повітря середнього вуха та рідини внутрішнього вуха.
6. Явище демпферування у вусі.
7. Пружні властивості барабанної перетинки і основної мембрани.
8. Перетворення акустичної енергії в електричний сигнал.

3.2. Зміст теми

§1. Будова вуха та послідовність поширення звуку в ньому.

З анатомічної точки зору орган слуху складається з трьох частин: зовнішнього, середнього та внутрішнього вуха (рис.1).

З фізіологічної точки зору слухова система складається з двох частин: звукопровідної (зовнішнє і середнє вуха) і звукоприймаючої (внутрішнє вуха).

Зовнішнє вуха складається з вушної раковини **1** і зовнішнього слухового проходу **2**, який закритий барабанною перетинкою **3**.

Середнє вуха починається за барабанною перетинкою і являє собою камеру, заповнену повітрям. Середнє вуха сполучене з носоглоткою через Євстахієву трубу, завдяки чому тиск по обидва боки барабанної перетинки однаковий. У порожнині середнього вуха знаходяться три слухові кісточки, зв'язані між собою: молоточок **4**, ковадло **5** та стремінце **6**. Молоточок сполучений з барабанною перетинкою, сприймає її коливання і через інші дві кісточки передає ці коливання до овального віконця внутрішнього вуха.

Внутрішнє вуха міститься в товщі скроневої кістки і має дуже складну будову. У ньому розрізняють такі частини: завитку **3**, три напівколових канали **К**, що утворюють вестибулярний апарат людини (рис. 2). Головною частиною внутрішнього вуха є завитка – орган який сприймає звукові коливання і перетворює їх в електричний сигнал. Завитка людини – кісткове утворення довжиною майже 35 мм і має форму конусоподібної спіралі. На малюнку 1 завитка (обмежена штриховою лінією) зображена розгорнутою для зручного розгляду. Внутрішня порожнина завитки розділена двома мембранами (вестибулярною **12** і основною **13**) на три канали: вестибулярний **8**, барабанний **10** і завитковий. Основною називають товсту (нижню) мембрану, вестибулярною – тонку (верхню) мембрану.

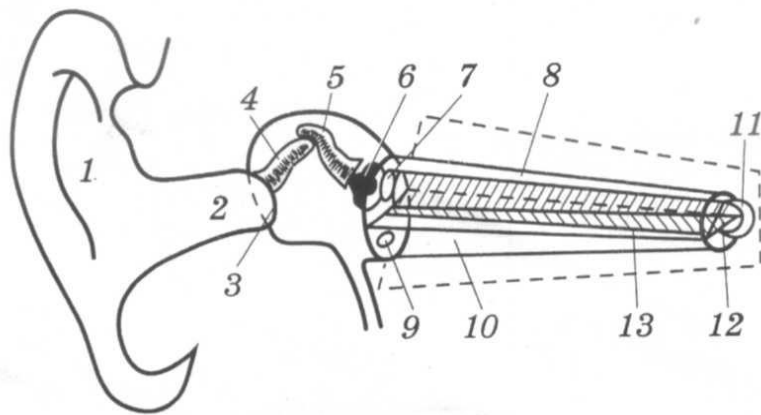


Рис. 1.

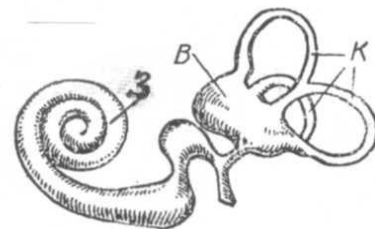


Рис. 2.

Вестибулярний (верхній) канал починається від овального вікна 7, барабанний (нижній) – від круглого вікна 9. Ці обидва канали заповнені перилімфою і з'єднані в області купола завитки через малий отвір (гелікотрему) 11. Завитковий канал (середній) – простір між вестибулярною і основною мембранами, заповнений ендолімфою. Основна мембрана складається з волокон, натягнутих упоперек ходу мембрани (на зразок драбини). На основній мембрані знаходиться кортієв орган, який містить волоскові клітини (рецепторні клітини з волосками на їх верхівці). На них закінчуються чутливі волокна слухового нерва. Над волосковими клітинами кортієвого органа знаходиться покривна мембрана (пластинка), яка нависає над ними, наче дах.

Розглянемо послідовність поширення звукової хвилі в вусі. Звукова хвиля, пройшовши зовнішнє вухо, наштовхується на туго натягнуту барабанну перетинку і приводить її в рух. З барабанною перетинкою зв'язана система слухових кісточок середнього вуха, які передають звукові коливання на овальне вікно, яке відокремлює рідину (перилімфу) внутрішнього вуха від повітряного простору середнього вуха. Рух рідини у вестибулярному і барабанному каналах внутрішнього вуха змушує основну мембрану здійснювати коливання в залежності від частоти і сили звуку. Рух основної мембрани стимулює рецепторні

клітини, розташовані в кортієвому органі, в результаті з'являються потенціали дії, які передаються слуховими нервами в кору головного мозку.

§2. Фізична модель органу слуху

Орган слуху людини можна моделювати як систему, яка складається з двох частин: звукопровідної і звукоприймаючої.

- **Звукопровідна частина** – зовнішнє і середнє вухо.
- **Звукоприймаюча частина** – внутрішнє вухо.

Кожна складова органу слуху відіграє певну роль для слуху. А саме:

- **Вушна раковина** забезпечує спрямованість слухового сприйняття і локалізацію джерела звуку (див. §3).
- **Зовнішнє вухо** забезпечує резонансне сприйняття звуків в широкому діапазоні частот, максимум якого припадає на частоти 2–4 кГц (див. §4).
- **Середнє вухо** забезпечує узгодження акустичних опорів повітря і рідини внутрішнього вуха, внаслідок чого суттєво зменшуються втрати інтенсивності звукової хвилі при її переході з повітря середнього вуха в рідке середовище внутрішнього вуха (див. §6). Крім того воно виконує ще одну функцію – демпферування, тобто послаблення передачі звукових коливань при їх великій інтенсивності (на рівні больового відчуття), (див. §7).
- **Внутрішнє вухо** перетворює механічні коливання в електричний сигнал (див. §9).

§3. Механізм просторової локалізації звуку

Вушні раковини у людини не грають суттєвої ролі для слуху. Вони збирають звукові хвилі, збільшують їх тиск майже вдвічі, а головне – забезпечують спрямованість слухового сприйняття і локалізацію джерела звуку.

Бінауральний слух – це сприйняття звуків двома вухами, що забезпечує здатність визначати напрям на джерело звуків.

Відомо три механізми, за допомогою яких можна розрізнити напрям на джерело звуку:

а) **Різниця спектрів**

Зміна спектрального складу звукової хвилі сприяє визначенню напрямку на джерело звуку при його розміщенні в вертикальній площині, в передньо-задньому напрямку. Пояснимо це. Звук від джерела попадає в вушну раковину. В залежності від розміщення джерела в вертикальній площині (рис. 3), звукові хвилі будуть по-різному дифрагувати на вушній раковині із-за її специфічної форми. Це приведе до зміни спектрального складу звукової хвилі, що попадає в слуховий прохід. Невеликі частотні спотворення сприйнятого звуку інтерпретуються мозком, як додаткова інформація про вертикальну (а також горизонтальну) локалізацію звуку. Людина в результаті досвіду навчилася розрізняти зміни спектру звукової хвилі в залежності від локалізації джерела звуку (напрямки А, Б, В на рис. 3).

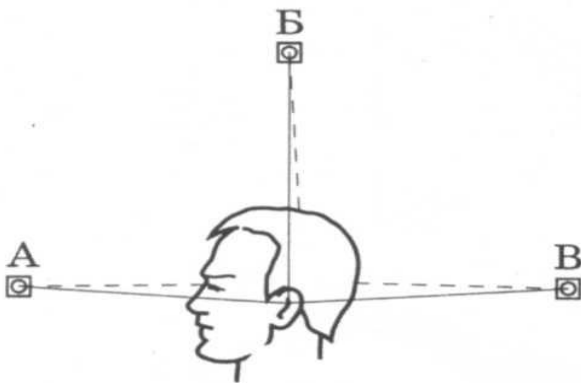


Рис.3.

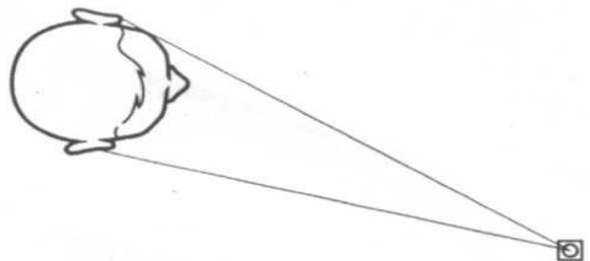


Рис. 4.

б) **Різниця фаз**

Різниця фаз для звукових хвиль, що попадають в праву і ліву вушні раковини сприяє визначенню напрямку на джерело звуку при його розміщенні в горизонтальній площині (рис. 4). Пояснимо це. Звук від джерела до вух проходить різні відстані і виникає різниця фаз для хвиль, що попадають в праву і ліву вушні

раковини. Зв'язок між різницею фаз ($\Delta\varphi$) і різницею відстаней (δ) інтерферуючих звукових хвиль записується:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\varphi = \frac{v}{2\pi \cdot \nu} \Delta\varphi, \quad (1)$$

де λ – довжина звукової хвилі ($\lambda = \frac{v}{\nu}$);

v – швидкість звуку (в повітрі $v \approx 330 \text{ м/с}$);

ν – частота звуку.

Підставивши дані в рівняння (1), визначимо різниці фаз для таких випадків:

- джерело звуку знаходиться перед лицем людини, тоді різниця відстаней $\delta=0$ і різниця фаз $\Delta\varphi=0$;
- джерело звуку розміщене збоку лівого вуха, тоді в праве вухо він попаде з запізненням. Будемо вважати, що різниця відстаней дорівнює відстані між вушними раковинами $\delta=0,165 \text{ м}$, тоді для звуку частотою $\nu=1 \text{ кГц}$ різниця фаз $\Delta\varphi=180^\circ$.

Отже, різним напрямкам на джерело звуку частотою 1000 Гц в горизонтальній площині будуть відповідати різниці фаз від 0 до 180° .

Людина здатна розрізняти зміну різниці фаз звукових хвиль, що попадають в її вуха, з точністю до 6° .

в) Різниця інтенсивностей

Різниця інтенсивностей для звукових хвиль, що досягли правого і лівого вуха також сприяє визначенню напрямку на джерело звуку при його розміщенні в горизонтальній площині (рис. 4). Пояснимо це. Орган слуху головним чином реагує на різницю інтенсивностей звуків високих частот ($1000\text{--}20000 \text{ Гц}$). Довжини хвиль звуків високих частот менші, ніж розміри голови, тому звуки, які досягають ближнього правого вуха, мають більшу інтенсивність, ніж звуки, що досягають в результаті дифракції дальнього лівого вуха.

Якщо різниця рівнів інтенсивності звуків високих частот досягає 1дБ, то цього вже досить для зразкового визначення напрямку на джерело звуку. Значення різниці рівнів інтенсивності високочастотних звуків може досягати 30дБ, що дозволяє визначати місце знаходження джерела звуку з точністю до $\pm 10^\circ$.

Зверніть увагу:

- *Описані механізми не працюють у воді. Визначення напрямку джерела звуку за різницею інтенсивностей і спектрів не можливо, оскільки звук переходить майже без втрат з води безпосередньо в вуха і голову людини, через що спектр та інтенсивність звуку в обох вухах при будь-якому розташуванні джерела звуку однакові. Визначення напрямку джерела звуку за різницею фаз також неможливо, оскільки швидкість звуку у воді зростає в кілька разів, а, отже, фазовий зсув багаторазово зменшується.*
- *Зрозуміла і причина неможливості визначення розташування джерел низькочастотного звуку (при зменшенні частоти звуку збільшується його довжина хвилі, зменшується “акустична тінь” від голови для одного вуха, а в результаті – зменшується різниця фаз і різниця інтенсивностей).*
- *Звуки частотою 3000Гц, які найкраще сприймаються вухом людини, неоптимальні для здійснення останніх двох механізмів визначення напрямку на джерело звуку (за різницею інтенсивностей і за різницею фаз).*
- *Бінауральному ефекту сприяють:*
 - *неоднакова інтенсивність звуку в різних вухах;*
 - *фазова різниця;*
 - *“акустична тінь” від голови для одного вуха (див. мал.4, в ліве вухо звук попадає від джерела в результаті дифракції).*
- *Здатність судження про напрямок на джерело звуку у людини обмежене. Оскільки у людини не має рухомих і зручних для збирання звуків вушних раковин, то вона у випадку сумнівів вдається до рухів голови і ставить її в таке положення, при якому звуки розрізняються найкращим чином, тобто звук локалізується людиною в тому напрямку, з якого він чується сильніше.*

- *Наші судження про відстань до джерела звуку є неточними, особливо якщо акустика оточення нетипова, або очі людини закриті і вона не бачить цього джерела і навколишні предмети, за якими можна судити про “акустичне оточення” на підставі життєвого досвіду. Наприклад: в акустичній камері голос людини, яка знаходиться всього за метр від слухача, здається останньому в рази і навіть десятки разів більш віддаленим. Також знайомі звуки видаються нам тим більш близькими, чим вони голосніші, і навпаки. Досвід показує, що ми менше помиляємося у визначенні відстані до джерела шумів, ніж музичних тонів.*

§4. Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході

Будова вушної раковини та слухового проходу забезпечує сприйняття звуків в широкому діапазоні частот, максимум якого припадає на частоти 2 – 4 кГц. Дійсно, звукові хвилі збираються вушною раковиною, поширюються слуховим проходом (довжина якого $l \approx 2,7\text{см}$), досягають барабанної перетинки (яка закриває слуховий прохід) і частково відбиваються від неї. В результаті інтерференції падаючої і відбитої хвиль може виникнути акустичний резонанс. Відомо, що акустичний резонанс має місце, якщо довжина хвилі в 4 рази більша довжини зовнішнього слухового проходу. Це дозволяє обчислити резонансну частоту за формулою:

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{\nu}{\lambda_{\text{рез}}} = \frac{\nu}{4 \cdot l} = \frac{330}{4 \cdot 0,027} = 3000 \text{ Гц} .$$

Отже, акустичний резонанс виникає при частоті 3000 Гц. Це означає, що саме звуки цієї частоти будуть мати найбільший коефіцієнт підсилення їх інтенсивності.

§5. Узгодження акустичних опорів повітря середнього вуха та рідини внутрішнього вуха.

Для плоскої гармонічної хвилі інтенсивність I зв'язана з надлишковим звуковим тиском Δp , що виникає у ділянках згущення частинок при розповсюдженні звукової хвилі, співвідношенням:

$$I = \frac{\Delta p^2}{2\rho \cdot v},$$

де ρ – густина середовища;

v – швидкість звуку.

Добуток $(\rho \cdot v)$ називають *акустичним опором* (імпедансом) середовища.

Акустичний опір середовища – важлива характеристика середовища, яка визначає умови відбивання і заломлення хвилі на межі розділу двох середовищ.

Закони відбивання і заломлення звукової хвилі аналогічні законам відбивання і заломлення світла.

Нехай звукова хвиля падає перпендикулярно до границі розділу двох середовищ, інтенсивність звуку в першому середовищі I_1 , інтенсивність хвилі, яка перейшла в друге середовище, I_2 . Величину $\beta = \frac{I_2}{I_1}$ називають *коефіцієнтом пропускання* звукової хвилі.

Наприклад: На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-5} Вт/м^2 . Інтенсивність звукової хвилі, що пройшла в друге середовище – 10^{-9} Вт/м^2 . Чому дорівнює коефіцієнт пропускання звукової хвилі?

Розв'язування:

За означенням коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\beta = \frac{I_2}{I_1} = \frac{10^{-9}}{10^{-5}} = 10^{-4} = 0,0001 \text{ або } 0,01\%$$

Якщо акустичні опори обох середовищ однакові ($\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$), то $\beta_{\max} = 1$ і звукова хвиля при нормальному (перпендикулярному) падінні перейде межу розділу без відбивання.

Якщо акустичний опір другого середовища набагато більший, ніж акустичний опір першого середовища ($\rho_2 v_2 \gg \rho_1 v_1$), то коефіцієнт пропускання обчислюється за формулою: $\beta = 4 \frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2}$ і буде $\beta \ll 1$.

Наприклад: коефіцієнт пропускання звукової хвилі з повітря в воду 0,123%, тобто дуже мала частина звукової енергії проходить з повітря в воду.

За законами акустики звукові хвилі відбиваються від поверхні середовищ, що мають різний акустичний опір. Безпосередня передача звукових коливань з повітря в рідке середовище внутрішнього вуха відбувається лише з великою втратою енергії. На основі розрахунків було встановлено що ця втрата енергії досягає в середньому 99.9%. Отже, слуховий рецептор не може сприймати звукові сигнали подібної інтенсивності і забезпечувати акустичне спілкування в життєдіяльності людини.

Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха полягає в трансформації звукових коливань повітря більшої амплітуди та малої сили в коливання рідини внутрішнього вуха з малою амплітудою та великою силою, в результаті чого звукові коливання доходять до сприймаючих елементів внутрішнього вуха, зберігаючи необхідну інтенсивність.

Використовуючи технічну мову, можна сказати, що середнє вуха узгоджує акустичний опір повітря середнього вуха і рідини внутрішнього вуха, внаслідок чого суттєво зменшуються втрати інтенсивності звукової хвилі при переході з повітря в рідке середовище внутрішнього вуха.

Трансформаційний ефект барабанної перетинки та ланцюга слухових кісточок людини досягається завдяки:

- різниці площ барабанної перетинки ($S_1 = 64 \text{ мм}^2$) та овального вікна ($S_2 = 3 \text{ мм}^2$) внутрішнього вуха ($S_1: S_2 \approx 20:1$);
- та важільній системі слухових кісточок (довге плече важеля в 1,3 рази більше коротшого, що забезпечує виграш в силі в 1,3 рази), (рис. 5).

Система слухових кісточок на одному кінці молоточком зв'язана з барабанною перетинкою, на другому – стремінцем – з овальним вікном внутрішнього вуха. Тому обидві мембрани і єднальні їх слухові кісточки виконують функцію трансформатора тиску.

Обґрунтуємо сказане.

На барабанну перетинку діє звуковий тиск p_1 , що обумовлює силу:

$$F_1 = p_1 S_1 \quad (2)$$

На овальне вікно внутрішнього вуха при цьому діє сила F_2 , що створює звуковий тиск p_2 перилімфі. Зв'язок між ними:

$$F_2 = p_2 S_2 \quad (3)$$

Система слухових кісточок працює як важіль відносно осі O , тому можна записати:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad (4)$$

Розділивши рівняння (2) на (3) і співставивши це відношення з (4), отримаємо:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{p_1 S_1}{p_2 S_2} = \frac{l_2}{l_1},$$

звідки

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} = 20 \cdot 1,3 = 26,$$

або в децибелах:

$$L_{\text{дБ}} = 20 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 20 \lg 26 = 20 \cdot 1,415 \approx 28 \text{ дБ}.$$

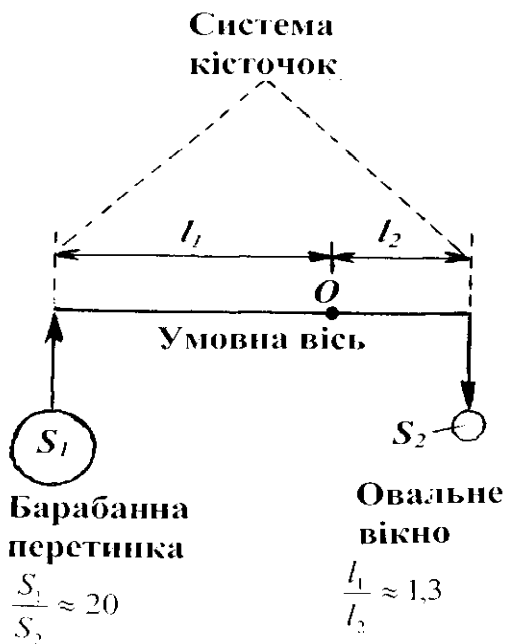


Рис. 5.

Отже, середнє вухо збільшує передачу зовнішнього тиску внутрішньому вусі в 26 раз, що відповідає посиленню рівня інтенсивності на рівні 28 дБ. А загальне максимальне посилення (включаючи і те, що виникає внаслідок резонансу в зовнішньому слуховому проході) становить 35–40 дБ.

Зверніть увагу:

- *При відсутності барабанної перетинки звукові хвилі в вусі взаємно нейтралізуються.*

§ 6. Явище демпферування у вусі

Фізіологічне значення середнього вуха не обмежується трансформацією (підсиленням) звукової хвилі. Воно виконує ще одну функцію – демпферування, тобто послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності (на рівні больового відчуття).

Захисно-пристосувальну функцію демпферування при дії звуків високої інтенсивності середнє вухо виконує завдяки:

- амортизаційному механізму суглобних зчленувань слухових кісточок (при інтенсивних звуках м'язи середнього вуха приходять в стан тетанічного скорочення, зменшуючи рухливість ланцюга кісточок, а при надсильних звуках фіксація кісточок цілком припиняє рух ланцюга);
- і зміні характеру коливань стремінця відповідно збільшенню звукового тиску. Наприклад, при невеликих звукових навантаженнях базальна пластинка стремінця коливається відносно поперечної осі. При збільшенні цих навантажень підніжна пластинка стремінця рухається навколо поздовжньої осі, в результаті чого зменшується загальна площа передачі коливань перилімфи. В тих випадках, коли інтенсивність звуку перевершує певний рівень, рухи підніжної пластинки стремінця набувають характеру ковзання в площині овального вікна і передача коливань рідині внутрішнього вуха стає мінімальною. Така зміна характеру рухів стремінця має вирішальне значення

для захисту внутрішнього вуха від механічних ушкоджень при різких раптових звуках, наприклад, вибухах, коли не встигає здійснитися будь-який рефлекторний механізм захисту.

Таким чином, систему передачі звуку, яка зосереджена в зовнішньому та середньому вусі, можна вважати механічним перетворювачем (підсилювачем), що володіє змінним, здатним регулюватися коефіцієнтом передачі тиску з барабанної перетинки на рідину внутрішнього вуха.

Зверніть увагу:

- *При руйнуванні слухових кісточок слух не втрачається повністю, але слабшає у 10^3 – 10^4 разів (або на 30–40 дБ).*

§ 7. Пружні властивості барабанної перетинки і основної мембрани

Барабанна перетинка – анатомічне утворення овальної форми (9 x10 мм), товщиною 0,1мм, яке складається з зовнішнього епідермального шару, середнього сполучно-тканинного (утворений радіальним і циркулярним шарами), внутрішнього слизового шару. Барабанна перетинка по периметру має фіброзне кільце.

Барабанна перетинка в нормі має неправильну форму і нерівномірний натяг на різних ділянках. Завдяки цим властивостям вона не має власної частоти коливань і коливається при всякому звуковому коливанні відповідно до його частоти. Ця властивість барабанної перетинки важлива тому, що інакше голосніше був би чутний звук, частота якого співпадала б з її власною частотою.

Форма зовнішнього слухового проходу забезпечує постійний рівень температури і вологості поблизу барабанної перетинки (незалежно від їхнього коливання в зовнішньому середовищі), що забезпечує стабільність пружних властивостей барабанної перетинки.

Коливання барабанної перетинки дуже швидко згасають. Швидкість згасання залежить від її пружності, яка змінюється під час скорочення або розслаблення м'язів перетинки, і тому не спричиняє жодного спотворення звукової хвилі.

Цікавим є питання про величини зміщень барабанної перетинки під дією звукової хвилі. Середня швидкість зміщення перетинки v_n пов'язана зі зміною звукового тиску P , швидкістю розповсюдження хвилі $v_{зв}$ і густиною повітря ρ за допомогою співвідношення:

$$v_n = \frac{P}{\rho \cdot v_{зв}}.$$

Щодо величини зміщення барабанної перетинки l_n , то її величина зв'язана з швидкістю v_n і частотою ν звукової хвилі формулою:

$$l_n = \frac{v_n}{2\pi\nu}.$$

Розглянемо числові значення величин v_n і l_n (табл. 1) при дії звуку частотою 1000 Гц різних інтенсивностей:

- на порозі чутності, де інтенсивність $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², швидкість руху і зміщення барабанної перетинки є дуже малими: $v_n \approx 5 \cdot 10^{-8}$ м/с, $l_n = 10^{-11}$ м;
- на больовому порозі, де $I_{max} = 10$ Вт/м², величини v_n і l_n стають набагато більшими: $v_n \approx 0,15$ м/с, $l_n = 2 \cdot 10^{-5}$ м. Такі досить великі зміщення l_n стають причиною появи болю в м'язах, що утримують барабанну перетинку;

Таблиця 1

Звук частотою 1000Гц		Середня швидкість зміщення барабанної перетинки $v_n \left(\frac{м}{с}\right)$	Зміщення барабанної перетинки l_n (м)
Інтенсивність $\left(\frac{Вт}{м^2}\right)$	Рівень інтенсивності (дБ)		
$I_0 = 10^{-12}$	0	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-11}
$I_{max} = 10$	130	0,15	$2 \cdot 10^{-5}$
$I = 10^4$	160	5	10^{-3}

- при зростанні інтенсивності ще на 3 порядки, тобто при інтенсивності $I = 10^4 \text{ Вт/м}^2$ або при рівні інтенсивності $L = 160 \text{ дБ}$, швидкість коливань перетинки досягає : $v_n \approx 5 \text{ м/с}$, а максимальна величина зміщення барабанної перетинки стає порядку 1 мм, що не дозволяє м'язам утримати її неушкодженою. Це приводить до її руйнування під дією дуже великої енергії звукової хвилі, що припадає на одиницю площі барабанної перетинки.

Основна (базилярна) мембрана натягнута вздовж усього завитка (рис.6) і складається з близько 24000 еластичних волокон різної довжини, які розміщені в поперечному (радіальному) напрямі. Біля основи завитки еластичні волокна короткі (біля 0,04 мм), тонкі і більш натягнуті. Біля вершини – довгі (до 0,5 мм) більш товстіші і менш натягнуті. Отже, основна мембрана дуже неоднорідна по довжині: від овального вікна вона розширюється і товстішає. Поруч зі стремінцем вона найлегша і має приблизно в 100 разів більше значення модуля пружності, ніж біля вершини.

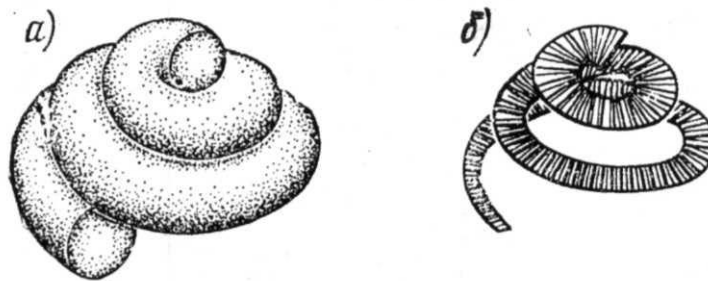


Рис. 6

Завдяки неоднорідним механічним властивостям основної мембрани звуки різної частоти надають руху різним її ділянкам:

- звуки низьких частот (менше 100Гц) викликають коливання найбільш масивної

частини мембрани біля гелікотреми;

- звуки високих частот (8000 і більше Гц), навпаки, надають руху ділянці і мембрани поблизу овального вікна;
- для звуку частотою 1600 Гц максимум коливань лежить біля середини завитки.

Отже, сприйняття звукових частот визначається локалізацією максимальних коливань відповідних ділянок основної мембрани.

Цікаво відзначити:

- видалення мембрани Рейснера (вестибулярної) і кортієвого органа не позначається на параметрах коливань основної мембрани. Звідси був зроблений висновок, що вібрації овального вікна викликають механічні коливання основної мембрани, а інші структури, що прилягають до неї, сприяють перетворенню її механічних коливань у відповідні нервові сигнали.

§8 Перетворення акустичної енергії в електричний сигнал

Перетворювачем механічних коливань в електричний сигнал служить кортієв орган *КО*, що розміщений в завитковому каналі *З* на основній мембрані *ОМ* (рис.7а). Він складається з чутливих волоскових клітин *ВК* (рис. 7б), до яких підходять розгалуження волокон слухового нерва. Над кортієвим органом розміщена покривна пластинка *ПМ*.

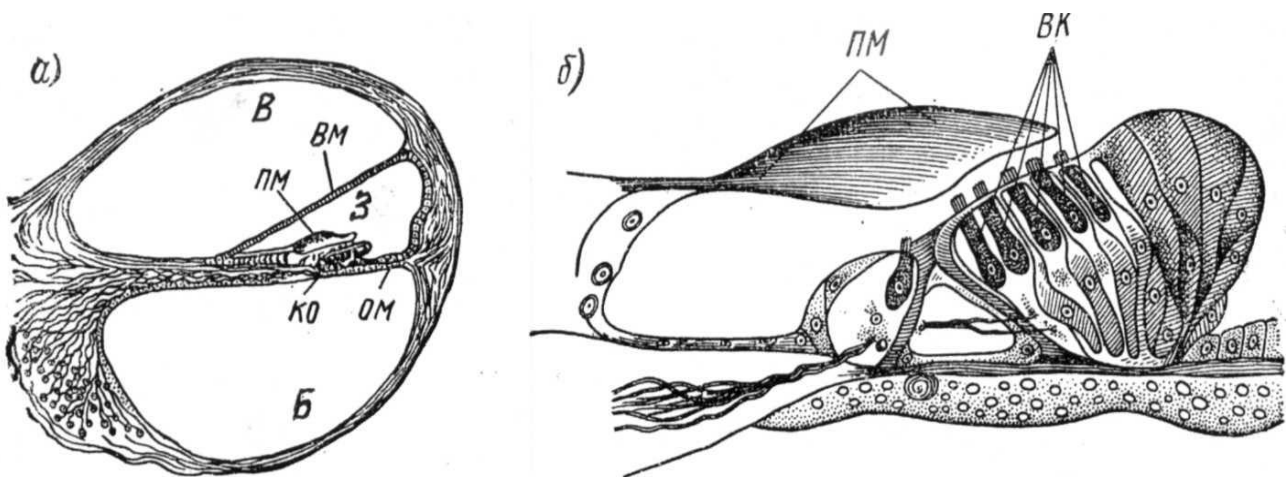


Рис. 7

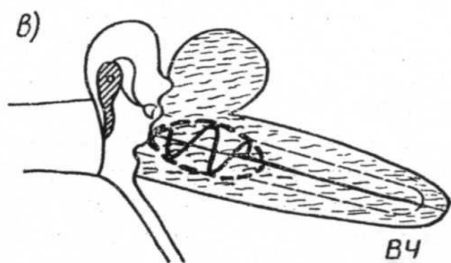
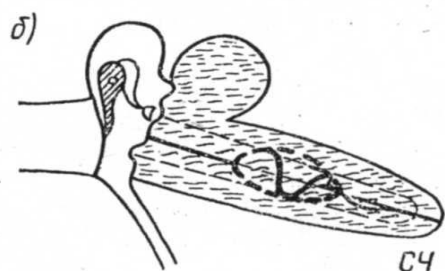
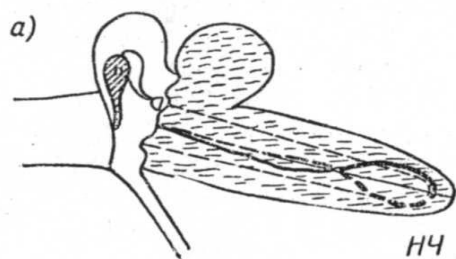
Звукові коливання діють на барабанну перетинку, через слухові кісточки на овальне вікно, а потім передаються рідинам і мембранам (вібруючим структурам) внутрішнього вуха.

Аналіз звуку в завитці відбувається внаслідок частотно-відбіркової селекції сигналів уздовж основної мембрани за допомогою резонансу. Цю точку зору вперше висловив німецький фізіолог і фізик Г.Гельмгольц (1863). Коротко його “резонансну теорію” можна викласти таким чином. Основна мембрана складається з волокон (струн) різної довжини. Найкоротші волокна розміщені в основі завитки, найдовші – на верхівці. Кожне волокно має резонансну частоту, за якої воно коливається з максимальною амплітудою. Звуки низької частоти призводять до вібрації довгих волокон, звуки високої частоти – до вібрації коротших волокон. Тобто, відповідно до частоти звуку вібрації відчувають лише певні групи волокон, вони спричиняють збудження волосяних клітин кортієвого органу. Таким чином, завдяки резонансу волокон основної мембрани спіральний орган здійснює первинний частотний аналіз звуку.

Аналогічного висновку дійшов лауреат Нобелівської премії Д. Бекеші після серії дослідів на морських свинках і препаратах завитки людини. Свої погляди на механізм слуху він виклав як теорію “бігучої хвилі” (1960). За цією теорією, у відповідь на звуковий подразник у середині завитки виникає бігуча акустична хвиля, яка поширюється від основи до верхівки вздовж основної мембрани. Відстань, яку проходить хвиля по мембрані, визначається частотою звуку.

Бігуча хвиля від звуків низьких частот здатна проходити на великі відстані і спричиняти деформацію основної мембрани по всій її довжині, але найбільша амплітуда коливань основної мембрани на верхівці завитки (рис. 8а).

Бігуча хвиля від звуків високих частот проходить меншу відстань і зумовлює максимальну деформацію основної мембрани (а відповідно і максимальне подразнення волоскових клітин кортієвого органу) переважно в ділянці основної закрутки завитки (рис. 8в).



Розподіл амплітуд коливань вздовж основної мембрани схематично зображено на рис.8.

Амплітуда коливань максимальна в тих клітинах основної мембрани, частота власних коливань яких збігається з частотою звуків, що сприймаються, внаслідок чого виникає резонанс. Цим пояснюється здатність вух сприймати складний звук загалом, хоча кожний простий звук резонує з однією волосковою клітиною. Під час резонансу змінюється ступінь дотикання волоскових клітин *ВК* з покривною пластинкою (рис.7б), в зв'язку з чим в клітинах виникають нервові імпульси. Ці імпульси передаються в

Рис. 8

центральну нервову систему, звідки до нервових клітин відповідної ділянки кори головного мозку. Відчуття висоти визначається ділянкою максимальної амплітуди коливань основної мембрани.

Отже, основну мембрану можна розглядати як нелінійну коливальну систему, що функціонує подібно до системи механічних мікрорезонаторів, в якій локальне розташування максимального зміщення залежить від частоти коливань. Це локальне подразнення спричиняє виникнення серії електричних імпульсів у певному нервовому волокні, що входить до складу слухового нерва. В цілому, по слуховому нерву в мозок передається серія імпульсів, що несуть інформацію про амплітуду та частоту коливань або інформацію щодо спектрального складу звуку, яка піддається аналізу в

слухових центрах кори головного мозку, де остаточно і формується суб'єктивне відчуття звуку.

Варто визначити, що концепція Д.Бекеші по своїй суті не заперечує резонансної теорії Г.Гельмгольца, а лише доповнює її гідродинамічними механізмами (ця теорія має назву гідродинамічної).

Примітка:

- В діапазоні 60–1000 Гц людське вухо може розрізняти частоти, що відрізняються на 2–3 Гц.

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Бінауральний слух	Бінауральний слух – це сприйняття звуків двома вухами, що забезпечує здатність визначати напрям на джерело звуків
Яка роль вушних раковин для слуху?	Вушні раковини забезпечують спрямованість слухового сприйняття і локалізацію джерела звуку.
Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході	Акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході має місце, якщо довжина хвилі в 4 рази більша довжини зовнішнього слухового проходу.
Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха	Головна роль барабанної перетинки і системи слухових кісточок середнього вуха полягає в трансформації звукових коливань повітря більшої амплітуди та малої сили в коливання рідини внутрішнього вуха з малою амплітудою та великою силою.
Демпферування у вусі	Демпферування у вусі – це послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності (на рівні болювого відчуття)

Що відбувається в кортієвому органі?	В кортієвому органі відбувається перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну.
Яку роль виконує у вусі Євстахієва труба?	Євстахієва труба з'єднує середнє вухо з носоглоткою і служить для вирівнювання тиску по обидві сторони барабанної перетинки.

3.5. Розв'язати задачі:

Задача 1. На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-8} Вт/м². Коефіцієнт пропускання звукової хвилі дорівнює 0,01. Чому дорівнює інтенсивність звукової хвилі, що перейшла в друге середовище?

Задача 2. На межу розділу двох середовищ падає звук, інтенсивність якого 10^{-5} Вт/м². Коефіцієнт відбивання звукової хвилі дорівнює 0,30. Чому дорівнює інтенсивність відбитої звукової хвилі?

3.6. Завдання для самоконтролю (тести):

- З яких частин складається вухо з анатомічної точки зору?
 - зовнішнє, середнє і внутрішнє вухо;
 - звукопровідної і звукоприймаючої;
 - вушна раковина, середнє вухо, завитка.
- З яких частин складається вухо з фізіологічної точки зору?
 - зовнішнє, середнє і внутрішнє вухо;
 - звукопровідної і звукоприймаючої;
 - вушна раковина, середнє вухо, завитка.
- В якій складовій органу слуху здійснюється акустичний резонанс в результаті інтерференції падаючої і відбитої звукових хвиль?
 - вушній раковині;
 - внутрішньому вусі;

в) зовнішньому слуховому проході;

г) середньому вусі.

4. Трансформація звукових коливань повітря у звукові коливання рідкого середовища відбувається:

а) у середньому вусі;

б) у зовнішньому слуховому проході;

в) у євстаховій трубі

г) в органі Корті.

5. Резонанс у зовнішньому слуховому проході спостерігається, якщо його довжина:

а) дорівнює довжині звукової хвилі;

б) становить $1/4$ довжини звукової хвилі;

в) становить $1/2$ довжини звукової хвилі;

г) становить $3/4$ довжини звукової хвилі.

6. При якій частоті звуку виникає акустичний резонанс в зовнішньому слуховому проході?

а) 1000 Гц; б) 2000 Гц; в) 3000 Гц; г) 4000 Гц.

7. Яку роль відіграють вушні раковини для слуху?

а) здійснюють акустичний резонанс ;

б) забезпечують здатність визначати напрям на джерело звуку;

в) узгоджують акустичний опір повітря середнього вуха і рідини внутрішнього вуха;

г) всі відповіді правильні.

8. Якої частоти звук має максимальне підсилення інтенсивності в зовнішньому слуховому проході?

а) 1кГц; б) 2кГц; в) 3кГц; г) 4кГц.

9. При яких значеннях рівня інтенсивності барабанна перетинка руйнується?

а) $L < 130\text{дБ}$; б) $L < 100\text{дБ}$; в) $L \geq 160\text{дБ}$; г) $L \geq 130\text{дБ}$.

10. Механізми просторової локалізації звуку:

- а) за різницею спектрів звуків;
- б) за різницею фаз звуків;
- в) за різницею інтенсивності звуків;
- г) всі відповіді правильні

Правильні відповіді: 1–а; 2–б; 3–в; 4–а; 5–б; 6–в; 7–б; 8–в; 9–в; 10–г.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.- с. 165 - 170.
2. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - Вінниця.: Нова книга, 2017.- 528 с. (**Розділ 1:** 1.5.1. - 1.5.3.).

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. Швидкість переміщення барабанної перетинки:
 - а) збігається зі швидкістю частинок у плоскій хвилі у повітрі;
 - б) збігається зі швидкістю частинок у плоскій хвилі у перилімфі;
 - в) набагато менша від швидкості частинок у плоскій хвилі у повітрі;
 - г) набагато більша від швидкості частинок у плоскій хвилі у повітрі.
2. Послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності (на рівні больового відчуття) називається...
 - а) бінауральним слухом;
 - б) демпферуванням у вусі;
 - в) трансформаційним ефектом;
 - г) зниженням слуху.

3. Чому в кортієвому органі немає кровоносних судин?

- а) щоб він не викликав руху мембрани овального вікна;
- б) щоб він викликав резонанс при коливаннях основної мембрани;
- в) щоб пульсації кров'яного тиску не надавали руху волосковим клітинам і не викликали слухових відчуттів;
- г) всі відповіді вірні.

4. Якою повинна бути довжина звукової хвилі відносно довжини резонатора, щоб в останньому спостерігався акустичний резонанс?

- а) довжина звукової хвилі в 2 рази більша, ніж довжина резонатора;
- б) довжина резонатора становить $1/4$ довжини звукової хвилі;
- в) довжина резонатора в 4 рази більша, ніж довжина звукової хвилі;
- г) їх довжини однакові.

5. Яку роль виконує у вусі Євстахієва труба?

- а) служить для вирівнювання тиску по обидві сторони барабанної перетинки;
- б) перетворює механічної енергії акустичних хвиль в електричну;
- в) забезпечує здатність визначати напрям на джерело звуків;
- г) забезпечують здатність визначати напрям на джерело звуку.

6. Чутливість вуха людини максимальна для частоти:

- а) $\nu = 16$ Гц;
- б) $\nu = 20$ кГц;
- в) $\nu = 1$ кГц;
- г) $\nu = 1$ МГц.

7. Що таке бінауральний слух?

- а) служить для вирівнювання тиску по обидві сторони барабанної перетинки;
- б) це сприйняття звуків двома вухами, що забезпечує здатність визначати напрям на джерело звуків.

в) це послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності.

г) це перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну.

8. Що відбувається завдяки різниці площ барабанної перетинки і овального вікна та важільній системі слухових кісточок?

а) перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну;

б) вирівнювання тиску по обидві сторони барабанної перетинки;

в) трансформація звукових коливань повітря у звукові коливання рідинного середовища внутрішнього вуха;

г) послаблення передачі звукових коливань у випадку їх великої інтенсивності.

9. Завдяки яким властивостям барабанна перетинка не має власної частоти коливань?

а) барабанна перетинка в нормі має неправильну форму;

б) барабанна перетинка в нормі має нерівномірний натяг на різних ділянках;

в) всі відповіді правильні.

10. Барабанна перетинка не має власної частоти коливань. Як це впливає на сприйняття звукових коливань?

а) інакше не був би чутний звук, частота якого співпадала б з її власною частотою;

б) інакше зовсім не був би чутний звук;

в) інакше голосніше був би чутний звук, частота якого співпадала б з її власною частотою;

г) немає правильної відповіді.

11. Якою повинна бути довжина звукової хвилі відносно зовнішнього слухового проходу, щоб в ньому виникав акустичний резонанс?

- а) довжина хвилі в 4 рази менша за довжину зовнішнього слухового проходу;
- б) довжина звукової хвилі в 4 рази більша за довжину зовнішнього слухового проходу;
- в) довжина хвилі дорівнює довжині зовнішнього слухового проходу.

12. В якому органі відбувається перетворення механічної енергії акустичних хвиль в електричну?

- а) у зовнішньому вусі;
- б) у середньому вусі;
- в) в євстахієвій трубі;
- г) в органі Корті.

Перелік використаної літератури

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.- 760 с.
2. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - Вінниця.: Нова книга, 2017.- 528 с.
3. Дяков В.А. і співавтори. Лабораторний практикум з медичної і біологічної фізики. – В.: ВНМУ, 2010. -260с.