

## Биомедицинские приборы и системы

УДК 534.134

**В.С. Дідковський**, д.-р. техн. наук, **С.А. Луньова**, канд. техн. наук, **К.С. Замша**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16, м. Київ, 03056, Україна.

### Низькочастотний механізм передачі звукового сигналу отоакустичної емісії

*Обговорюються можливі шляхи зворотної передачі сигналу отоакустичної емісії із завитки внутрішнього вуха у канал зовнішнього вуха. Пропонується метод, оснований на аналізі енергетичних втрат звукових коливань, що передаються у внутрішнє вухо прямим шляхом, та зворотним – із внутрішнього вуха у зовнішній слуховий прохід. На основі експериментальних даних щодо відповідності стимулу та рівнів прийнятого сигналу отоакустичної емісії витікає висновок про можливість передачі сигналу отоакустичної емісії круглим вікном завитки на низьких частотах.* Бібл. 13, рис. 2.

**Ключові слова:** отоакустична емісія; низькі частоти; кругле вікно; енергетичні втрати.

#### Вступ

Феномен отоакустичної емісії (ОАЕ) як відповіді слухового апарату на зовнішній звуковий вплив вперше описаний Кемпом [1-3] наприкінці минулого століття, але і до цього часу залишається предметом дослідження та обговорення як фізіологів та акустиків, так і медиків.

За Кемпом, ОАЕ – це надзвичайно слабкі звукові коливання, які реєструються у зовнішньому слуховому проході в результаті механічних процесів, що відбуваються у внутрішньому вусі, а саме, у зовнішніх волоскових клітинах (ЗВК) органу Корті. Активні рухи ЗВК передаються базиллярній мембрані завитки, створюючи зворотно направлені бігучі хвилі, які діють на пластинку стремінця і викликають коливальний рух слухових кісточок та барабанної перетинки, а в наслідку – і стовпа повітря у зовнішньому слуховому проході.

Сигнали отоакустичної емісії реєструються як при відсутності звукової стимуляції (спонтанна отоакустична емісія), так і у відповідь на звуковий стимул (викликана отоакустична емісія).

Викликану отоакустичну емісію (ВОАЕ) розглядають як затриману ВОАЕ, яка фіксується після закінчення стимулу, та отоакустичну

емісію на частоті стимуляції (що супроводжується генерацією додаткової енергії на частоті стимулу) та на частоті продукту спотворення (при одночасному впливі двох тональних стимулів відгук реєструється на деякій іншій частоті).

Сучасне пояснення ефекту отоакустичної емісії базується на виявленому факті здібності ЗВК до високочастотних скорочень під впливом електричного поля [4]. Найбільш поширена модель генерації відповідного сигналу у завитці зводиться до наступного. Зовнішні волоскові клітини, що розташовані у 3-4 ряди на базиллярній мембрані, своїми виростами (стереоциліями) контактують з покривною мембраною. Під дією прямої бігучої хвилі у завитці виникає поперечне зміщення базиллярної мембрани, яке призводить до зміщення ЗВК відносно покривної мембрани. За прийнятою моделлю, зусилля, які створюються ЗВК, призводять до зсувних зміщень базиллярної мембрани відносно покривної мембрани, що супроводжується поперечними коливаннями базиллярної мембрани [5].

Зауважимо, що така модель ОАЕ до кінця не з'ясовує складний механізм процесу. Залишаються відкритими ряд принципових питань, а саме, якими ділянками базиллярної мембрани генерується звуковий сигнал (оскільки основні частотні компоненти затриманої ВОАЕ розташовані в діапазоні 0,5-4 кГц [6], а спонтанної – в межах 1.5-5 кГц [5]) та як частотна локалізація цих ділянок пов'язана зі спектральними складовими стимулу і т.і.

Але, не зважаючи на певні прогалини такої моделі, вона дозволяє пояснити механізм ОАЕ за допомогою відомого ефекту зворотного акустичного зв'язку. Свого часу, в акустиці ця модель виникла для описання зворотних акустичних процесів в електроакустичній системі, коли звуковий сигнал з виходу через акустичне поле знову потрапляє на вхід системи. На нашу думку, такий підхід до трактування отоакустичної емісії прямо пов'язаний із широким застосуванням методу електроакустичних аналогій для моделювання роботи слухової системи [7,8].

Цей метод дозволяє за допомогою електроакустичних схем поєднати характеристики акустичного поля, механічної коливальної системи та наявність електричного поля в завитці. Прийом достатньо зручний, але потребує значної кількості припущень і призводить до спрощеного моделювання процесів. Зокрема, його використання найбільш обгрунтоване в області низьких частот.

Однак, зазначимо, що сучасні описання процесів отоакустичної емісії, навіть у такий спрощений спосіб, стосуються тільки генерації сигналу і не торкаються процесів передачі згенерованого звуку із завитки у зовнішнє вухо. Модель передачі звукових коливань рідини у завитці через систему звукових кісточок на барабану перетинку, запропонована ще Кемпом, з того часу не обговорювалася.

В зв'язку з цим, вважаємо, слід звернути увагу на те, що, виходячи з будови внутрішнього вуха, передача коливань із завитки у середнє вухо може відбуватися як через овальне, так і через кругле вікно. Вірогідність переливання рідини через гелікотрему на низьких частотах і при достатніх рівнях звукових стимулів визнавалася багатьма авторами [7,9]. Крім того, зважаючи на складний рух важільного механізму слухових кісточок, передача через нього звукових коливань у зворотному напрямі також викликає певні сумніви.

Отже, виникає потреба у детальному аналізі можливих шляхів передачі сигналу отоакустичної емісії із завитки через середнє вухо, що і є предметом обговорення даної статті.

## Методика

Метод дослідження базується на аналізі втрат звукової енергії при прямій передачі звуку у завитку внутрішнього вуха і зворотній – сигналу отоакустичної емісії у зовнішнє вухо.

Оскільки загальні втрати звукової енергії (від моменту подання сигналу на зовнішнє вухо до прийому відповідного сигналу отоакустичної емісії) складаються з втрат при розповсюдженні звукових коливань і формуванні відгуку у завитці (ОАЕ), то подальші дослідження передбачають розрахунок та порівняння втрат енергії при проходженні сигналу прямим та зворотним шляхом (як через овальне так і через кругле вікно) і оцінку при цьому величини втрат на генерацію сигналу отоакустичної емісії.

В розрахунках обмежимося областю низьких частот (до резонансів в каналі зовнішнього вуха та барабанної перетинки і системи слухових кісточок), коли процес передачі звуку можна вважати частотно незалежним.

Розрахунок прямого шляху передачі звуку із зовнішнього вуха через барабанну перетинку, слухові кісточки та овальне вікно в завитку враховує наступні складові трансформації енергії: важільний механізм системи слухових кісточок, наявність акустичного трансформатора у вигляді порожнини середнього вуха з вхідним отвором, що дорівнює ефективній площі барабанної перетинки, та вихідним – із площею овольного вікна, та втрати енергії при проходженні звуку у середовище барабанної перетинки і через мембрану овольного вікна -у лімфатичну рідину завитки (рис.1).

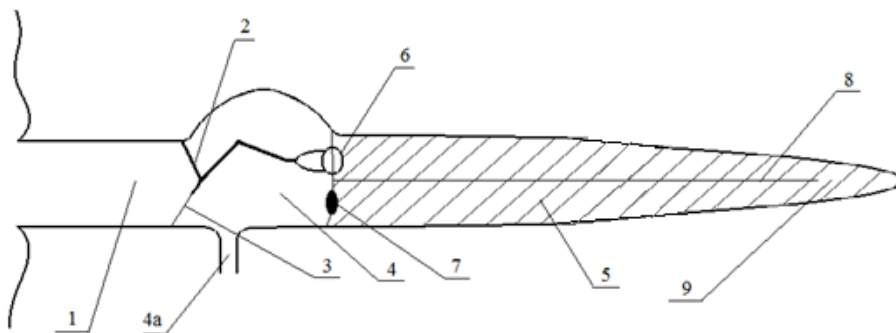


Рис. 1. Спрощена структура слухового апарату людини: 1-зовнішній слуховий прохід; 2-ефективна частина барабанної перетинки, пов'язана зі слуховими кісточками; 3-вільна частина барабанної перетинки (мембрана); 4- порожнина середнього вуха; 4а-євстахієва труба; 5-завитка внутрішнього вуха (у розпрямленому вигляді); 6-овальне вікно; 7-кругле вікно; 8-базиллярна мембрана; 9-гелікотрема (будова вестибулярного апарату на схемі не врахована)

Зауважимо, що оскільки в механічному та акустичному трансформаторі трансформується сила та коливальна швидкість, більш коректно говорити про зміни звукової енергії, ніж про зміни звукового тиску.

Енергія сигналу, що пройшов через межу розподілу двох середовищ, визначається через енергію падаючої хвилі, взяту з ваговим коефіцієнтом проходження по енергії [10]:

$$\tau = \frac{4\varepsilon}{(1 + \varepsilon)^2}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon = \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$  ( $\rho_1 c_1$  та  $\rho_2 c_2$  хвильові опори, відповідно, першого і другого середовища;  $\rho$  - густина середовища,  $c$  - швидкість середовища).

На зворотному шляху через овальне вікно і систему слухових кісточок енергія сигналу отоакустичної емісії має піддатися таким самим перетворенням, тільки у зворотному напрямі.

Для аналізу зворотного шляху через кругле вікно розглядаються дві моделі.

Перша – звукові коливання круглого вікна завитки передаються через порожнину середнього вуха на барабанну перетинку і, завдяки коливанням її вільної частини, не пов'язаної зі слуховими кісточками, - в канал зовнішнього вуха. При цьому вважаємо вільну частину барабанної перетинки ідеальною мембраною. В решті, враховуємо втрати енергії при переході звуку з рідини в повітря через мембрану круглого вікна і коефіцієнт зниження акустичного трансформатора з вхідним отвором з площею круглого вікна і вихідним - з площею вільної частини барабанної перетинки, а далі – з площею перетину зовнішнього слухового каналу.

Друга, уточнююча, модель передбачає врахування товщини барабанної перетинки, яка представляється шаром середовища (рис.2). Звукові коливання через кругле вікно проходять з рідини завитки у повітря порожнини середнього вуха, звідки через шар середовища барабанної перетинки – в зовнішній слуховий прохід, заповнений повітрям. Ця модель додатково до втрат енергії за першою моделлю враховує енергетичні втрати при передачі звуку через шар середовища.

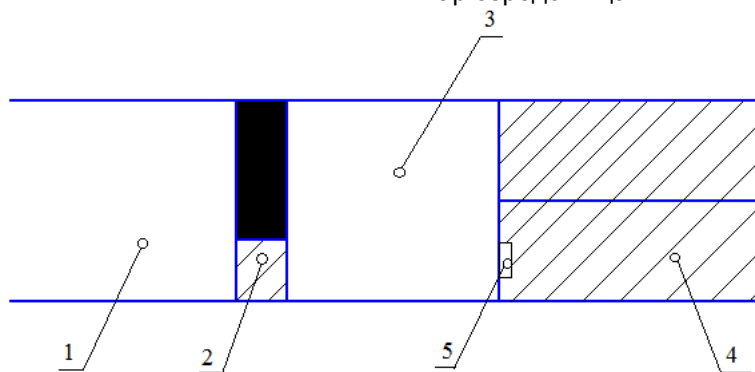


Рис. 2. Модель зворотного проходження звуку ОАЕ через кругле вікно з врахуванням товщини барабанної перетинки: 1-канал зовнішнього слухового проходу (повітря); 2-вільна частина барабанної перетинки (шар середовища); 3-шар повітря порожнини середнього вуха; 4-завитка (рідини); 5-кругле вікно

Передача звукової енергії через шар середовища при нормальному падінні звукової хвилі відбувається з коефіцієнтом передачі [10, 11]:

$$t = 4 / [4 \cos^2(k_2 d) + (\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 + \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1)^2 \sin^2 k_2 d], \quad (2)$$

де  $d$  - товщина шару;  $k_1$  та  $k_2$  - хвильові числа середовища та шару між ним;  $k = \frac{2\pi f}{c}$ ,  $f$  - частота сигналу,  $c$  - швидкість звуку у відповідному середовищі.

Для тонкого шару з хвильовими розмірами  $kd \ll 1$ :

$$t = 4 / [4 + (\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 + \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1)^2 k_2 d]. \quad (3)$$

Виконавши необхідні розрахунки, щодо втрат звукової енергії у прямому і зворотному напрямі, зробимо висновки про можливі шляхи передачі сигналу отоакустичної емісії.

### Результати та їх обговорення

Розрахунки втрат звукової енергії виконані на основі даних, що наводяться в роботах [4-6] з питань отоакустичної емісії. Автори цих робіт стверджують, що при посиленні звукового сигналу

з рівнем 80 дБ відгук, тобто сигнал ОАЕ, складає 10 дБ.

Таким чином, втрати звукової енергії на проходження сигналу із зовнішнього вуха в завитку, формування відгуку та виходу відповідного сигналу в зовнішній слуховий прохід становлять 70 дБ.

При передачі звуку прямим шляхом рівень вхідного сигналу, що дорівнює  $L = 80$  дБ, відповідає інтенсивності звуку

$$I = I_0 \cdot 10^{0,1L}, \quad (4)$$

де  $I_0 = 10^{-12} \text{ Bm}/\text{M}^2$  – порогове значення інтенсивності звукового сигналу (на порозі чутності на частоті 1000 Гц), тобто величина інтенсивності вхідного сигналу:

$$I_{\text{ex}} = 10^{-4} \left( \text{Bm}/\text{M}^2 \right).$$

Втрати енергії звуку, пов'язані з передачею звукових коливань з повітря у барабанну перетинку знаходимо за формулою [1], де хвильовий опір повітря дорівнює  $\rho_1 c_1 = 420 \frac{\text{кг}}{\text{M}^2 \cdot \text{с}}$ . Величину хвильового опору середовища барабанної перетинки визначаємо, виходячи з її розмірів та ваги і швидкості звуку у м'язевій тканині [12, 13]:

$$\rho_2 c_2 = 2.1 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{M}^2 \cdot \text{с}}.$$

Для узгодження передачі звукових коливань хвильовий опір ланцюжку пористих слухових кісточок має наблизитися до цієї величини (хвильовий опір пористої кісткової тканини, за нашими розрахунками, знаходиться в межах  $(2,5 - 2,7) \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{M}^2 \cdot \text{с}}$ , а з урахуванням поєднувальної хрящовидної тканини дещо знижується). В результаті коефіцієнт проходження по енергії становить:

$$\tau_1 = 0,8 \cdot 10^{-3}.$$

Отже інтенсивність звуку, що пройшов у середовище барабанної перетинки, приблизно дорівнює:

$$I_{\text{от}} = 0,8 \cdot 10^{-7} \text{ Bm}/\text{M}^2.$$

Коефіцієнт підсилення акустичного трансформатора, який визначається як відношення ефективної площі барабанної перетинки (55 мм<sup>2</sup>) до площі овального вікна (3,2 мм<sup>2</sup>), дорівнює 17 [12]. Коефіцієнт підсилення важільного механізму складає 1,3 [9]. Отже, загальний

коефіцієнт підсилення дорівнює 22, і інтенсивність звуку на стремінці тоді становить:

$$I_{\text{отр}} = 17,6 \cdot 10^{-7} \text{ Bm}/\text{M}^2.$$

Подальше поширення звуку через мембрану овального вікна ( $(\rho c)_M = 1.7 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{M}^2 \cdot \text{с}}$ ) у рідину

завитки ( $(\rho c)_P = 1.5 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{M}^2 \cdot \text{с}}$ ) призводить до незначних втрат енергії сигналу (відповідні передавальні коефіцієнти  $\tau_2 = 0,98$ ,  $\tau_3 = 0,99$ ), що свідчить про добре узгодження акустичних опорів середовищ.

Таким чином, вважаємо, що інтенсивність звуку, який пройшов у завитку (біля овального вікна), дорівнює:

$$I_3 = 17,1 \cdot 10^{-7} \text{ Bm}/\text{M}^2,$$

що відповідає звуковому тиску:

$$P_3 = \sqrt{I_3 \cdot (\rho c)_P} = 1,6 \text{ Па}.$$

Якщо сигнал ОАЕ в зворотному напрямі розповсюджується через овальне вікно, систему кісточок і ефективну частину площі барабанної перетинки, маємо проаналізувати послідовність зміни інтенсивності сигналу у зворотному напрямі.

Для того, щоб на виході отримати сигнал у 10 дБ, тобто з інтенсивністю (за формулою (4),

$$I_{\text{ex}} = 10^{-11} \text{ Bm}/\text{M}^2,$$

потрібно, щоб інтенсивність сигналу ОАЕ у завитці (біля овального вікна) становила:

$$I_{\text{OAE}} = 28 \cdot 10^{-8} \text{ Bm}/\text{M}^2$$

(звуковий тиск при цьому дорівнює  $P_{\text{OAE}} = 0,65 \text{ Па}$ ).

Тоді при переході через межі розподілу рідини-овальне вікно-стремінце інтенсивність звуку також зменшиться у  $1,03 \cdot 10^{-3}$  разів і дорівнюватиме  $27,2 \cdot 10^{-8} \text{ Bm}/\text{M}^2$ .

Важільний механізм і акустичний трансформатор, які працюють у зворотному напрямі, знижують інтенсивність звуку ще у 22 рази, і таким чином,

$$I_{\text{от}} = 1,24 \cdot 10^{-8} \text{ Bm}/\text{M}^2.$$

Перехід звукових коливань із середовища барабанної перетинки в повітря зовнішнього вуха призводить до подальшого зниження енергії в  $1,25 \cdot 10^{-3}$  разів і

$$I_{\text{вух}} = 10^{-11} \text{ Bm}/\text{M}^2.$$

На основі відношення інтенсивності звуку  $I_3$ , що увійшов у завитку, та інтенсивності звукових коливань на виході із завитки  $I_{\text{OAE}}$  введемо енергетичний коефіцієнт зворотної передачі акустичної хвилі у завитці  $\eta$ , який у випадку зворотного напрямку розповсюдження звуку через овальне вікно та систему слухових кісточок дорівнює:

$$\eta_0 = I_{\text{OAE}}/I_3 = 0,16,$$

або  $\eta_0\% = 16\%$ ;  $\eta_{0,\text{дБ}} = -8\text{дБ}$  (аналогічний коефіцієнт зворотної передачі за тиском  $\eta_{0p} = 0,4$ ).

Зазначимо, що очікується суттєва залежність запропонованого коефіцієнту від частоти, але для процесу, який відбувається на низьких частотах, одержані величини мають цілком достовірне значення.

Тепер розглянемо альтернативний шлях звукової хвилі ОАЕ через кругле вікно.

Щоб отримати на виході інтенсивність звуку  $I_{\text{вух}} = 10^{-11} \text{ Bm}/\text{M}^2$ , необхідно створити на вході в кругле вікно з боку завитки інтенсивність  $I_K = 19,6 \cdot 10^{-8} \text{ Bm}/\text{M}^2$ . Тоді понижувальний акустичний трансформатор (кругле вікно площею  $2 \text{ мм}^2$  – вільна частина барабанної перетинки площею  $25 \text{ мм}^2$ ) має коефіцієнт трансформації  $0,08$ , а перехід звукових коливань у зовнішній слуховий прохід площею  $38,5 \text{ мм}^2$  (діаметр  $7 \text{ мм}$ ) ще зазнає трансформації у  $0,7$  разів. В результаті інтенсивність сигналу з урахуванням передачі звуку із завитки через мембрану круглого вікна у повітря порожнини середнього вуха на виході складає:

$$I_{\text{вух}} = 10^{-11} \text{ Bm}/\text{M}^2.$$

В цьому разі енергетичний коефіцієнт зворотної передачі акустичної хвилі у завитці становить:

$$\eta_K = 0,12,$$

і наближається до аналогічного коефіцієнту передачі через овальне вікно ( $\eta_0 = 0,16$ ).

Близькі значення коефіцієнтів передачі сигналу ОАЕ двома шляхами вважаємо цілком закономірними (причому, те що  $\eta_K < \eta_0$  пояснюється додатковими втратами звукової енергії генерованого у завитці сигналу при передачі коливань через гелікотрему).

Щоб з'ясувати частотний діапазон, в якому можлива передача звуку ОАЕ через кругле вікно, введемо дещо уточнюючу модель, в якій не вважатимемо вільну частину барабанної перетинки ідеальною мембраною, а врахуємо, що вона має певну товщину (приблизно  $0,1 \text{ мм}$  [12]). Шар повітря в порожнині середнього вуха значно більший за товщину барабанної перетинки. Отже, вважатимемо, що звукова хвиля, що виникла в середньому вусі, додатково проходить через шар середовища барабанної перетинки. Оскільки хвильова товщина шару барабанної перетинки залишається величиною другого порядку малості навіть на частоті  $20 \text{ кГц}$ , то обчислення коефіцієнту проходження звуку по енергії виконаємо за формулою (3), яка в результаті підстановки чисельних даних зводиться до виразу:

$$t = 4/(4 + 0,4 \cdot 10^{-5} f^2).$$

Будемо виходити з того, що інтенсивність сигналу ОАЕ не перевищує інтенсивності звукових коливань, які досягли завитки (хоча в роботі [6] вказується на можливість такого перевищення, але ми вважаємо, що це явище більш характерне для резонансних ділянок частотної характеристики ОАЕ).

Оскільки при розрахунках за першою моделлю передачі звуку через кругле вікно ми одержали коефіцієнт зворотної передачі акустичної хвилі в завитці порядку  $0,16$ , то при коефіцієнті проходження звуку через шар барабанної перетинки  $t = 0,16$ , одержимо  $I_3 = I_{\text{OAE}}$ , тобто згенерований у завитці зворотний сигнал буде дорівнювати вхідному сигналу у завитку.

Вважаємо цей випадок обмежувальним, і з цієї умови знаходимо граничну низьку частоту, до якої звукові коливання ОАЕ можуть розповсюджуватися через кругле вікно у зовнішнє вухо.

Якщо втрати звукової енергії у завитці залишаються на тому ж рівні, що і при передачі сигналу ОАЕ через овальне вікно ( $\eta_0 = 0,16$ ), необхідно, щоб через шар середовища барабанної перетинки звукові коливання проходили майже без втрат енергії (приймемо  $t = 0,9$ ). За таких умов сигнал ОАЕ може передаватися через кругле вікно до частоти приблизно  $320 \text{ Гц}$ .

Отже, що стосується механізму передачі звукових коливань із завитки через кругле вікно, то на низьких частотах він рівновірогідний з передачею звуку через овальне вікно, але можливість передачі сигналу ОАЕ тісно пов'язана із величиною та частотою генерованого у завитці

сигналу, а також здатністю передачі коливання даної частоти через гелікотрему.

### Висновки

Запропонований метод дослідження можливих шляхів передачі зворотного сигналу отоакустичної емісії.

Метод базується на основі втрат звукової енергії при прямій передачі звуку у завитку внутрішнього вуха і зворотній- сигналу ОАЕ у зовнішнє вуха.

Обчислюються енергетичні втрати звукових коливань на прямому шляху акустичного сигналу із зовнішнього вуха, заповненого повітрям, через барабанну перетинку та механізм слухових кісточок у лімфатичну рідину внутрішнього вуха.

На основі існуючих експериментальних даних та аналізу втрат звукової енергії сигналу ОАЕ при зворотному шляху передачі, тотожному прямому, знаходиться енергетичний коефіцієнт генерації сигналів ОАЕ у завитці (в області низьких частот).

Виконаний розрахунок втрат звукової енергії сигналу, що передається із завитки внутрішнього вуха через кругле вікно та через порожнину середнього вуха і далі, завдяки коливання вільної частини барабанної перетинки, не пов'язаної зі слуховими кісточками, - у канал зовнішнього вуха, підтверджує можливість передачі сигналу ОАЕ (майже з таким самим коефіцієнтом передачі) через кругле вікно завитки. Верхня частота сигналу при цьому знаходиться в межах 320 Гц.

Подальше обговорення можливості передачі сигналів ОАЕ через кругле вікно пов'язане із визначенням коефіцієнту утворення сигналу ОАЕ у завитці та можливістю передачі коливань відповідної частоти через гелікотрему завитки внутрішнього вуха.

### Список використаних джерел

1. *Kemp D. T.* Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system // *JASA*, №64 (5), 1978. – p. 1386 - 1391.

2. *Kemp D. T., Ryan S., Bray P.* A guide to the effective use of otoacoustic emissions // *Ear Hear*, №11, 1990. – p. 93 - 105.
3. *Kemp D. T.* Exploring cochlear status with otoacoustic emissions. In: *Otoacoustic Emissions – Clinical Applications / by Robinette R. M., Glatke T. (eds).* – 2<sup>nd</sup> ed. – New York: Thieme, 2002. – p. 1 - 47.
4. *Fastl H., Zwicker E.* *Psycho – Acoustic Fact and Models.* – Third Edition, 2006.
5. *Пасечник В. И.* Природа флуктуаций при спонтанной отоакустической эмиссии // *Биофизика*, т. XXXIV, вып. 1, 1989. – с. 118 - 123.
6. *Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А.* Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 360 с.
7. *Фланаган Д. Л.* Анализ, синтез и восприятие речи. – М.: Связь, 1968. – 418 с.
8. *Purcell D.W.* Estimating bone conduction transfer functions using otoacoustic emissions // *JASA*, Vol. 114, №2, 2003. – p. 907-918.
9. *Шельфанд С. А.* Слух: введение в психологическую и физиологическую акустику. – М.: Медицина, 1984. – 350 с.
10. *Лепендин Л. Ф.* Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
11. *Скучик Е.* Основы акустики. – т. 1. – М.: Мир, 1976. – 520 с.
12. *Бекеши Дж., Роземблит В. А.* Механические свойства уха. – ВКН.: Экспериментальная психология / под ред. Дж. Бекеши. – М.: Иностранная литература. – т.2, 1963. – 724 с.
13. *Bergevin C., Olson E. S.* External and middle ear sound pressure distribution and acoustic coupling to the tympanic membrane // *JASA*, Vol. 135, №3, 2014. – p. 1294 – 1312.

Поступила в редакцию 11 мая 2016 г.

УДК 534.134

**В.С. Дидковский**, д.-р. техн. наук, **С.А.Лунова**, канд. техн. наук, **К.С. Замша**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

## Низкочастотный механизм передачи звукового сигнала отоакустической эмиссии

*Обсуждаются возможные пути обратной передачи сигнала отоакустической эмиссии из завитки внутреннего уха. Предлагается метод, основанный на анализе энергетических потерь звуковых колебаний, которые передаются во внутреннее ухо прямым путем, и обратным – из внутреннего уха во внешний слуховой проход. На основании экспериментальных относительно соответственности стимула и уровней принятого сигнала отоакустической эмиссии следует вывод про возможность передачи сигнала отоакустической эмиссии круглым окном завитка на низких частотах. Библ. 13, рис. 2.*

**Ключевые слова:** отоакустическая эмиссия; низкие частоты; круглое окно; энергетические потери.

UDC 354.154

**V. Didkovskiy**, Dr.Sc., **S. Lunyova**, Ph.D., **K. Zamsha**

National Technical University of Ukraine 'Kiev Polytechnic Institute',  
st.Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

## The mechanism of transmission of low-frequency sound signals otoacoustic emissions

*The possible ways to reverse the signal otoacoustic emissions with cochlear inner ear to the canal of outer ear. Based on the energy loss during the passing of sound follows the conclusion about the possibility of passing otoacoustic emissions signal from round window of cochlear at low frequencies. References 13, figures 2.*

**Keywords:** otoacoustic emission; low-frequency; round window; energy loss.

### References

1. *Kemp, D. T.* (1978). Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *JASA*, №64 (5), pp. 1386 - 1391.
2. *Kemp, D. T., Ryan, S., Bray, P. A.* (1990). Guide to the effective use of otoacoustic emissions. *Ear Hear*, №11, pp. 93 - 105.
3. *Robinette, R. M., Glattke, T.* (2006). Exploring cochlear status with otoacoustic emissions. In: *Otoacoustic Emissions. Clinical Applications 2<sup>nd</sup> ed.* New York: Thieme, pp. 1 - 47.
4. *Fastl, H., Zwicker, E.* (2006). *Psycho – Acoustic Fact and Models. Third Edition.*
5. *Pasechnik, V. I.* (1989). Nature fluctuations in spontaneous otoacoustic emissions. *Biophysics*, pp. 118 -123.
6. *Altman, Ya. A., Tavartkiladze, G. A.* (2003). *Hand book on audiology*, DMK Press, Moscow, P. 360. (Rus)
7. *Flanagan, D. L.* (1968). *Analysis, Synthesis and Perception of speech*, P. 418. (Rus)
8. *Purcell, D. W.* (2003), Estimating bone conduction transfer functions using otoacoustic emissions. *JASA*, Vol. 114, №2, pp. 907-918.
9. *Gelfand, S. A.* (1984). *Rumor: an introduction to psychological and physiological acoustics*, P. 350. (Rus)
10. *Lependin, L. F.* (1978). *Acoustics*, Moscow, P. 448. (Rus)
11. *Skuchik, E.* (1976). *Fundamentals of Acoustics*, Moscow, P.520.(Rus)
12. *Békésy, J., Rosenblit, V.* (1963). *Mechanical properties of the ear.* WCS.: *Experimental Psychology*, Moscow, P. 724.
13. *Bergevin, C., Olson, E. S.* (2014). External and middle ear sound pressure distribution and acoustic coupling to the tympanic membrane. *JASA*, Vol. 135, №3, pp. 1294 – 1312.