УДК 612.85.916.61.65

Ю.В.Попов

Гідродинамічна модель завитки органа слуху з дискретною основною мембраною

В гидродинамической модели улитки органа слуха размером 520×120×100 мм с основной мембраной (ОМ), состоящей из дискретных резонансных звеньев в диапазоне от 1 до 128 Гц, путем подачи гармонического и импульсного возбуждающих сигналов в модель через мембрану окна преддверия и через нитку на базальную часть ОМ раздельно моделировались: а) непосредственная передача через заполняющую жидкость вдоль ОМ; б) передача путем бегущей волны по ОМ. Показано, что время передачи возбуждения в первом случае составляет 0,8 мс, а во втором - несколько секунд. При непосредственной передаче практически нет затухания амплитуды возбуждающего сигнала, при передаче бегущей волной затухание очень сильное. Сделан вывод, что основными гидродинамическими процессами в улитке являются процессы в соответствии с резонансной теорией Гельмгольца, а не теории бегущих волн Бекеши.

Вступ

Нині домінуючою теорією передачі та перетворення акустичного сигналу (АС) у завитці органа слуху є теорія біжучих хвиль Бекеші [10, 11]. У той же час згідно з цією теорією не вдається пояснити багато процесів, які існують у слуховій системі (СС), як наприклад, кодування частоти та інтенсивності складних АС, наявність диференційного порогу за частотою, латеральне гальмування тощо [3, 4]. Разом з тим всі феномени, які спостерігаються в СС, досить просто пояснити, використовуючи резонансну теорію Гельмгольца [12, 13]. Особливо привертають увагу в теорії біжучих хвиль Бекеші два факти: досить повільне розповсюдження біжучої хвилі вздовж основної мембрани (ОМ) завитки, час передачі якої до апікальної частини ОМ становить 5 мс [5, 6, 10]; надзвичайно мала амплітуда коливань ОМ при передачі АС від стремена біжучою хвилею, що змушує шукати якісь механізми підсилення в самій завитці для пояснення чутливості СС на порогових рівнях АС [2]. Незважаючи на те, що Бекеші безпосередньо спостерігав біжучу хвилю (так само, як і інші дослідники гідромеханіки завитки [14-16]) і реєстрував час її проходження до апікальної частини ОМ (близько 5 мс для завитки людини), а також сильне згасання амплітуди цієї хвилі, саме існування біжучої хвилі як механізму передачі АС у завитці викликає сумнів [7].

Згідно з резонансною теорією Гельмгольца передача АС на будь-яку ділянку ОМ відбувається безпосередньо через нестискувану рідину (перилімфу) зі швидкістю звуку в рідині, тобто, майже 1 450 м/с, причому при довжині ОМ людини близько 31 мм час проходження АС

до апікальної частини ОМ становитиме близько 23 мкс. При цьому передача АС через перилімфу по всій довжині завитки очевидно повинна здійснюватися практично без згасання. Тобто, виміри часу проходження АС до апікальної частини ОМ разом із вимірами амплітуди коливань ОМ можуть дати однозначну відповідь на те, яка із теорій - Бекеші чи Гельмгольца - правильно відображає процеси в завитці.

Цілком можливо, що Бекеші та інші дослідники завитки [10, 14-16] отримали хибні результати через те, що вони допускали істотні порушення гідромеханіки завитки проробленням технологічних отворів в її стінках для проведення спостережень, що могло повністю вимкнути механізм безпосередньої передачі АС у завитці, залишивши лише механізм біжучої хвилі. Це,в свою чергу, могло призвести до короткого акустичного замикання якраз тієї ділянки ОМ, за якою проводили спостереження, та до сильного згасання амплітуди коливань ОМ. У зв'язку з цим підвищується роль моделей завитки при конструюванні яких можна вводити необхідні елементи контролю в модель практично без порушення її гідродинамічних властивостей [1, 8].

Метою досліджень було показати: а) існування прямої безпосередньої передачі АС зі швидкістю звуку в рідині на будь-яку ділянку ОМ; б) існування резонансних процесів на ОМ відповідно до резонансної теорії Гельмгольца; в) мале згасання амплітуди коливань ОМ при безпосередній передачі АС через перилімфу; г) сильне згасання амплітуди біжучої хвилі на ОМ.

Методика

Модель з дискретною ОМ. Ця модель є подальшою розробкою моделі завитки з суцільною ОМ із гуми [9], яка мала певні вади, що не давали можливості отримувати стабільні результати. Оскільки, через 3-5 год з моменту наповнення моделі рідиною, гума ОМ набрякала, змінювалися параметри всієї моделі. Окрім того, густина гуми дещо більша такої води, що змушувало ставити модель у вертикальне положення для зменшення втрат на гістерезис при коливанні ОМ. На параметри моделі впливали також неоднорідність товщини та густини гуми, які залежать від технології її виготовлення. Досить складним виявився процес формування ОМ без попереднього натягування та провисання, яке ускладнювало регулювання ОМ. Для зменшення впливу всіх цих чинників вирішено розробити ОМ з дискретними резонансними елементами і щоб густина цих елементів дорівнювала густині заповнюючої модель рідини. При цьому були задані такі параметри: частотний діапазон від 1 до 128 Гц, кількість частотних каналів ОМ - 50, роздільна здатність за частотою - не менше 1/6 октави.

Резонансні ланки ОМ. Враховуючи, що при передачі АС у завитці фронт тиску хвилі збудження від стремена діє тангенціально площині ОМ, технологічно найкраще зробити резонансні ланки за типом струни із зосередженою масою. Проста струна дає можливість отримати великі величини добротності, але вона має побічні гармонійні складові, кратні основній, резонансній частоті, що не є бажаним. З іншого боку, зо-

середжена маса дає можливість акустично узгодити рідинне середовище моделі та резонансні ланки. Остання представляла собою тонкий стержень, жорстко припаяний одним кінцем до пластини з берилієвої бронзи (має високий коефіцієнт пружності і не кородує у воді), а другий кінець стержня через пружину кріпився до регулюючого гвинта в опорі. На самому стержні кріпилася маса. Вільний кінець пластини з бронзи закріплювався нерухомо в другій опорі. Матеріалом для мас обрали поліетилен (густина 0,977 г/см^3 - майже відповідає такій води), що давало можливсть досить легко виконати умову рівності густини маси та заповнюючої модель рідини (вода та 3 % спирту). Резонансні частоти та добротності резонансних ланок вимірювали у повітрі й у воді зі спиртом. Коливання збуджувалися соленоїдом і їх вимірювали за допомогою конденсаторного датчика. Добротність ланок у повітрі становила 70-100, а при коливанні у воді - 7-12. Частота коливань у воді зменшувалась у 1,4-2,1 рази залежно від чистоти обробки поверхні маси, приєднаної маси води, та збільшення тертя опору рідини. Вимірювали залежності значень власної резонансної частоти ланки від робочої грані маси в площині коливання. Слід зазначити, що при зміні площі робочої грані від 35 до 250 мм^2 при практично незмінній частоті коливань у повітрі (62,3 Гц) резонансна частота знижувалася до 33 Гц, а добротність зменшувалася з 14 до 6,2. Після досить довгого підбору конструкцій підвісу маси, пружностей, форми маси за основу була взята симетрична конструкція резонансної ланки з каплевидною формою маси та з пружностями по обох боках; ця конструкція дозволила отримати високу добротність ланок і низький рівень гармонік (добротність більше 8 у всьому діапазоні коливання резонансних ланок ОМ).

Конструкція моделі. Корпус моделі виготовлений із оргскла для можливості візуального спостереження за коливаннями ОМ. Стінки корпуса кріпилися між собою гвинтами; герметичність досягалася застосуванням прокладок із гуми. Загальні розміри моделі (без врахування виступаючих деталей): 520×180×100 мм. ОМ являла собою перегородку з оргскла з вирізом посередині для резонансних ланок. В апікальній частині зроблено регульований отвір (аналог гелікотреми). Настройка резонансних ланок здійснювалася за допомогою гвинтів, з'єднаних з циліндричними пружинами ланок. Гвинти через герметизовані отвори були виведені назовні. Верхня та нижня камери моделі (аналоги, відповідно, вестибулярного та барабанного ходів) у своїй торцевій частині мали, відповідно, вхідне та компенсаційне вікна, закриті гумою (аналоги вікна переддвер'я та вікна завитки). Вхідна мембрана мала отвір для з'єднання зі штоком вібратора, від якого подавалися коливання. У верхній кришці моделі через герметизовані отвори встановлено конденсаторні датчики, в якості яких використовувалися відрізки коаксиального кабеля. Центральний дріт з напаяною латунною пластинкою утворював одну частину датчика, а другою була латунна пластинка, закріплена на масі резонансної ланки і тонким дротом з'єднана з загальною електричною масою моделі (рис. 1).

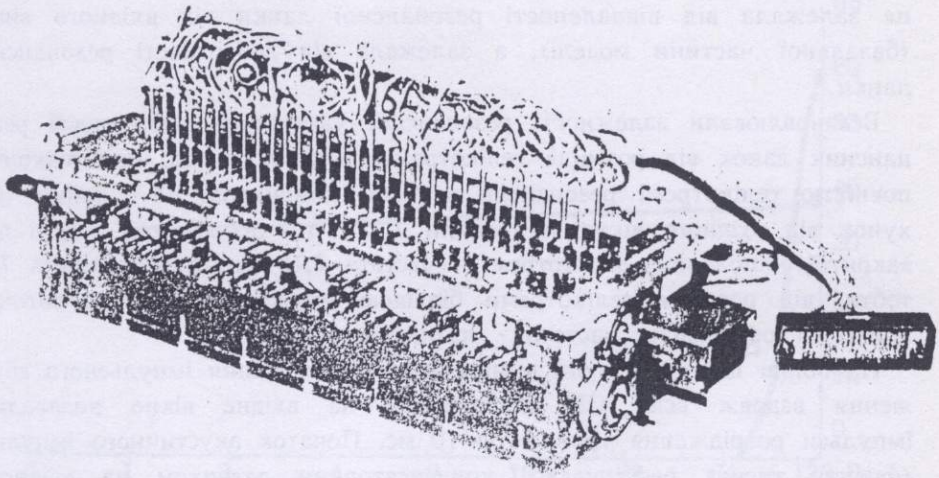

Рис. 1. Загальний вигляд моделі.

Комплекс апаратури для вимірювання параметрів моделі. Комплекс умовно можна розділити на два тракти: тракт збудження коливань і реєстрації. Для збудження коливань використовувалась електродинамічна головка від вимірювача вібраційної чутливості типу ІВЧ-2. Напруга на вібратор подавалася з підсилювача потужності (діапазон частот - 0-10 кГц, вихідна потужність - 20 Вт, вихідний опір - 0,12 Ом); сигнал на підсилювач і вібратор подавався з генератора напруги спеціальної форми типу Г6-27, частота контролювалася частотоміром типу Ч3-34, імпульсний сигнал подавався з генератора типу Г5-51. Для вимірювання амплітуди коливань ОМ на конденсаторні датчики подалася напруга частотою 100 кГц із спеціально сконструйованого генератора. Ця напруга на кожному датчику модулювалася коливанням маси відповідної резонансної ланки. Модульований сигнал далі подавався на синхронні детектори, на яких фільтрувалася несуча частота 100 кГц, а сигнал модуляції подавався на спеціально розроблені підсилювачі та на осцилограф типу С1-70 або на самописець.

Вимірювання характеристик моделі. Спочатку вимірювали амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) резонансних ланок ОМ та їх добротностей. На вібратор подавалася синусоїдальна напруга з частотами від 1 до 128 Гц. Вимірювання проводила в заповненій сумішшю води та спирту (близько 3 %) моделі (перед заповненням вода прогрівалася і до неї додавали трохи поверхнево-активної речовини для того, щоб не утворювалися бульбашки. Отримано такі результати: а) діапазон частот, на яких спостерігалися резонансні коливання ланок ОМ, був від 1,02 до 128 Гц; б) добротність резонансних ланок знаходилась у

межах від 6,2 до 8,6; в) амплітуда коливань резонансних ланок ОМ відрізнялася по довжині ОМ не більше ніж в 1,3 рази і практично не залежала від віддаленості резонансної ланки від вхідного вікна (базальної частини моделі), а залежала від добротності резонансної ланки.

Встановлювали залежності резонансної частоти та добротності резонансних ланок від розмірів гелікотреми. Виявилося, що при відкритій повністю гелікотремі резонансна частота, наприклад, 48-ї ланки (рахунок від вхідного вікна) становили 2,28 Гц і добротність 8,8, а при закритій наполовину гелікотремі - частота 2,18 Гц, а добротність 7,6; тобто, від розмірів гелікотреми більшою мірою залежить добротність ланки, а резонансна частота - незначно.

Найбільш цікавими були виміри часу проходження імпульсного збудження вздовж всієї ОМ. Для цього на вхідне вікно подавались імпульси розрідження тривалістю 10 мс. Початок акустичного імпульсу (фронту тиску) реєструвався конденсаторним датчиком на вхідному вікні. Час проходження (0,8 мс) реєструвався як час між переднім фронтом відхилення конденсаторного датчика вхідного вікна і найменш помітною зміною амплітуди коливань найбільш віддаленого (апікального) датчика ОМ (тобто, в загальний реєстрований час входила і деяка частка періоду коливань апікальної резонансної ланки ОМ). При подачі імпульсу можна було бачити, що після одночасного відхилення всіх ланок вони продовжували коливатися, причому кожна зі своїм періодом. Утворюючи при цьому картину біжучої хвилі від базальної частини ОМ до апікальної, бо ніякої передачі енергії від однієї ланки (більш високочастотної) до поряд розташованої (низькочастотної) не відбувалося. Просто після імпульсного збудження кожна резонансна ланка продовжувала коливатися зі зменшенням амплітуди за логарифмічним законом (згасаючі коливання), а кількість коливань залежала від добротності ланки. Амплітуда коливань усіх резонансних ланок ОМ при подачі імпульсного збудження була практично однаковою, відрізняючись не більше ніж в 1,3 рази, очевидно, залежачи лише від добротності ланок. Враховуючи одночасне відхилення всіх ланок при подачі імпульсу можна стверджувати, що передача збудження вздовж усієї моделі була безпосередньо через наповнюючу рідину. Намагалися збуджувати тільки біжучу хвилю. Для цього базальний конденсаторний датчик знімали і через його отвір пропускали нитку, один кінець якої кріпився до маси першої (найбільш високочастотної, базальної) резонансної ланки, другий кінець - до штока вібратора, на який подавався імпульс розрідження. Можна було спостерігати, як після збудження першої ланки в протифазі починалися коливання маси другої ланки, потім третьої, але амплітуда коливань різко зменшувалася і на четвертій ланці коливання вже не спостерігалося (амплітуда коливання штока становила 0,8 мм). Причому, загальний час проходження біжучої хвилі від моменту прогину першої ланки і до четвертої ланки становив близько 160 мс. Виміряти весь час проходження біжучої хвилі вздовж ОМ виявилося неможливим через

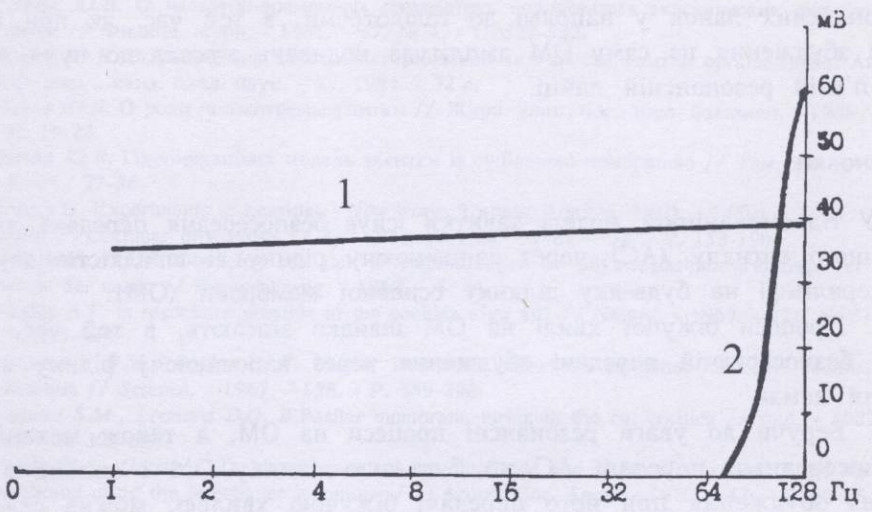

Рис. 2. Амплітуда коливань резонансних ланок ОМ при подачі імпульсу на мембрану вікна передвер'я (*1*) і на базальну частину ОМ (*2*)

сильне згасання амплітуди збудження вже після п'ятої ланки, але можна припустити (за допомогою екстраполяції), що цей час становив би декілька секунд. Амплітуди коливань резонансних ланок ОМ при подачі імпульсу збудження на мембрану вхідного вікна та при подачі безпосередньо через нитку на базальну резонансну ланку показані на рис. 2.

Обговорення результатів

При передачі збудження безпосередньо через перилімфу час проходження збудження від мембрани вхідного вікна до апікальної частини ОМ (відстань приблизно 490 мм) становив близько 0,8 мс. Доказом того, що за цей час можлива тільки безпосередня передача збудження через заповнюючу рідину, а не біжучою хвилею по ОМ, є, по-перше, сам час розповсюдження звуку в рідині - приблизно 0,33 мс, який наближається до 0,8 мс (в цей час входить і частина періоду коливання резонансної ланки з власною частотою коливань 1 Гц, тобто з періодом 1000 мс). По-друге, передача збудження лише біжучою хвилею (через нитку на базальну частину ОМ) і тільки на 5 резонансних ланках (із 50) зайняла близько 160 мс. Це є достовірним підтвердженням того, що головним механізмом передачі АС у нативній завитці є безпосередня його передача через перилімфу, а не шляхом біжучої хвилі на ОМ.

Такий же висновок можна зробити і на основі результатів вимірювань амплітуди коливань резонансних ланок ОМ при подачі на вхідне вікно гармонійного та імпульсного сигналів і безпосередньо на

початок (базальну частину) ОМ через нитку. При гармонійному і імпульсному сигналах, практично не зменшувалась амплітуда коливань резонансних ланок у напрямі до гелікотреми, в той час, як при подачі збудження на саму ОМ амплітуда коливань згасала до нуля вже на п'ятій резонансній ланці.

Висновки

1. У гідромеханічній моделі завитки існує безпосередня передача акустичного сигналу (АС) через заповнюючу рідину зі швидкістю звуку в перилімфі на будь-яку ділянку основної мембрани (ОМ).

2. Процеси біжучої хвилі на ОМ швидко згасають, в той час, як при безпосередній передачі збудження через наповнюючу рідину згасання немає.

3. Беручи до уваги резонансні процеси на ОМ, а також механізм безпосередньої передачі АС на будь-яку ділянку ОМ і сильне згасання збудження при його передачі біжучою хвилею, можна стверджувати, що в завитці головними є процеси, що узгоджуються з резонансною теорією Гельмгольца, а не теорією біжучих хвиль Бекеші.

Yu.Popov

THE HYDRODYNAMICAL MODEL OF A COCHLEA WITH DISCRETE BASILAR MEMBRANE

The hydrodinamical model of a cochlea (dimensions 520x120x100 (mm)), with the basilar membrane (BM) consisting of 50 discrete resonance links in the frequency band from 1 Hz to 128 Hz was constructed. Two ways of giving harmonical and impulse's signals at the model were used: a) through the membrane of the vestibular window (directly through the filled model liquid along the BM) and b) through the thread fastened to the basal part of the BM (by the travelling wave on the BM). It was shown that in the first case the transmission's time to apical part of the BM equals 0,8 ms and in the second - several seconds. The conclusion is that the main hydrodynamical processes of sound's coding in a cochlea are the processes according to the Helmholtz's resonance theory, but not Bekesy's travelling wave theory.

Kiev. Scientific-Research Institute of Otolaryngology
Ministry of Public Health of Ukraine

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Молчанов А.П., Бабкина Л.Н.* Электрические модели механизмов улитки органа слуха. - Л.: Наука, 1978. - 181 с.
2. *Пасечник В.И.* Механизмы улитки органа слуха. - В кн.: Физиология человека и животных. Итоги науки и техники. - М.; Наука, 1988. - Т. 39. - С. 7-21.
3. *Попов Ю.В.* О существовании бегущих волн в улитке // Журн. ушн., нос., горл. болезней. - 1981. - 6. - С. 17-21.
4. *Попов Ю.В.* Порівняльний аналіз теорій слуху: біжучих хвиль Бекеші та резонансної - Гельмгольца // Там же. - 1995. - 45 - С. 42-53.

5. *Попов Ю.В.* Временные параметры передачи звука в модели улитки органа слуха // ДАН УССР. - 1984. - № 9. - С. 13-15.
6. *Попов Ю.В.* О частотно-временных параметрах кодирования акустических сигналов в улитке // Физиол. журн. - 1981. - **27**, № 4. - С. 527-532.
7. *Попов Ю.В.* Исследование акусто-электрической активности улитки органа слуха: Автореф. дис. ...канд. биол. наук. - К., 1984. - 32 с.
8. *Попов Ю.В.* О роли геликотремы улитки // Журн. ушн., нос., горл. болезней. - 1986. - 3. - С. 19-23.
9. *Попов Ю.В.* Гідромеханічна модель завитки із суцільною мембраною // Там. же. - 1996. - **2**. - С. 27-36.
10. *Bekesy G.* Experiments in hearing. - New York, Toronto, London, 1960. - 745 p.
11. *Dallos P.* Cochlear physiology // Ann. Rev. Psychol. - 1981. - **32**. - P. 153-190.
12. *Helmholtz H.L.F.* Die lehre von den tonempfindungen als physioogischem grundlage fur die theorie der music // Braunschweig. - 1863. - S. 41.
13. *Huxley A.F.* Is resonance possible in the cochlea after all? // Nature. - 1969. - **221**, № 5184. - P. 935-940.
14. *Johnstone B.M., Boyle A.J.F.* Basilar membrane vibrations examined with the Mossbauer technique // Science. - 1967. - **158**. - P. 389-390.
15. *Khanna S.M., Leonard D.G.* B.Basilar membrane turing in the cat cochlea // Ibid. - 1982. - **215**. - P. 305-308.
16. *Rhode W.S., Geisler C.D.* Measurement of the amplitude and phase of vibration of the basilar membrane using the Mossbauer technique // J.Acoust. Soc. Amer. - 1970. - **47**. - P. 60-68.

Київ. наук.-дослід. ін-т отоларингології
ім. проф. О.С.Коломійченка
М-ва охорони здоров'я України

Матеріал надійшов
до редакції 27.10.96