

ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ ЧЕРЕЗ СКЛЯНІ ПЕРЕГОРОДКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ

В роботі шляхом фізико-технічного моделювання продемонстровано процес проходження звукових хвиль у системі повітряний простір - скляна перегородка - повітряний простір. Показано формування хвилі згину у скляній перегородці, визначені частоти просторового резонансу для різних її геометричних розмірів. Обчислено коефіцієнт звукоізоляції перегородки у діапазоні низьких та середніх частот. Показано, що статистична теорія дає занижені результати звукоізоляції скляних перегородок і не відображає ефекту зниження звукоізоляції на частотах просторового резонансу.

In this paper, by means of physical and technical modelling, demonstration of the process of sound waves transmission in the system "airspace – glass partition – airspace" is provided. Formation of glass partition fold line is presented, space resonance frequency for its different geometrical sections are specified. Partition soundproofing factor in the frequency of low and medium rates are calculated. It is shown that statistical theory gives understated results of glass partition isolation and does not reflect the effect of soundproofing reduction on spatial resonance frequencies.

1. ВСТУП

Одним із основних способів технічного захисту від витоку акустичної інформації через будівельні конструкції приміщення є звукоізоляція [1,2]. Проблема звукоізоляції з математичної та фізичної точок зору є складною, але теоретично вона була вирішена давно. Всі теоретичні вирази величини звукоізоляції є складними і громіздкими, тому найчастіше визначення звукоізоляції проводиться експериментальним шляхом. Теоретичні дослідження зазвичай проводяться за статистичною теорією поширення звукових хвиль шляхом послідовних наближень, спрощень формул з указанням меж їх застосувань, а вирази зводяться до достатньо простих, які потім використовуються для практичних розрахунків [3,4]. Однак, при такому визначенні звукоізоляції не враховується хвильовий характер поширення акустичних хвиль, а розрахунки проводяться для нескінченних плит певної товщини, що призводить до суперечливих

¹ Національний університет «Львівська політехніка»

даних щодо звукоізоляції. При цьому, зазвичай, не враховуються резонансні явища поверхонь. Зважаючи на те, що вікна у захищених приміщеннях є одними з найслабших елементів з точки зору звукоізолюючої здатності, дослідження проникнення звукових хвиль через скляні перегородки шляхом фізико-технічного моделювання та обчислення їх коефіцієнта ізоляції є актуальним завданням для вирішення проблем витоку через них мовної інформації.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ОПИС МОДЕЛІ

Дослідження поширення звукових хвиль, породжених точковим джерелом звуку, проводились на двовимірній моделі системи «відкритий простір – скляна перегородка – відкритий простір» (рис.1), шляхом моделювання акустичного поля в середовищі фізико-технічного моделювання COMSOL Multiphysics 3.5a [5].

Джерело звуку потужністю P , розташоване у точці $R=R_0$ у нижній частині моделі, породжує хвилі акустичного тиску $p_a(t) = p_m \cos(j\omega t)$ у відкритому повітряному середовищі, поширення яких описується рівнянням Гельмгольца [3]:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p_a \right) - \frac{\omega^2 p_a}{\rho_0 c^2} = 2 \sqrt{\frac{\pi P c}{\rho_0}} \delta^{(2)}(R - R_0),$$

де p_a – акустичний тиск, c – швидкість звуку в повітрі; ρ_0 – щільність повітря.

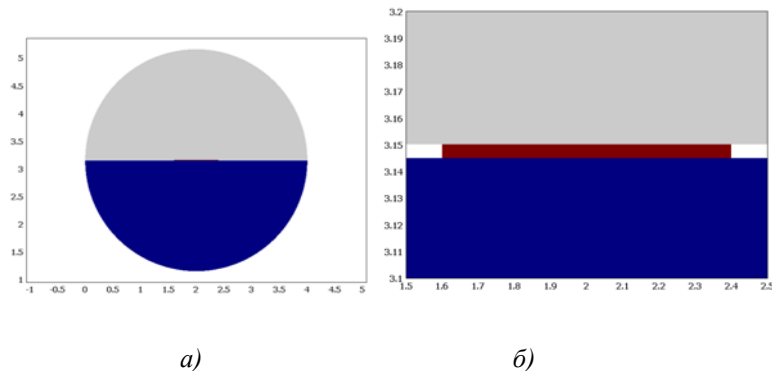


Рис.1. Геометрія моделі системи відкритий простір – скляна перегородка – (а) відкритий простір та(б) збільшений вигляд ділянки перегородки

При моделюванні вважаємо, що поверхні, у яких міститься перегородка, відбивають хвилі без поглинання. На межах півкругів, що представляють відкритий простір задавалась гранична умова випромінювання хвиль [6].

Напруження на нижній поверхні скла задається навантаженням F , яке визначається акустичним тиском хвилі, породженої джерелом звуку:

$$F = -n_s p_a,$$

де n_s – зовнішньоспрямований одиничний нормальний вектор з площини твердого середовища.

Напруження σ у твердому середовищі (склі) пов'язані з деформаціями ε співвідношенням:

$$\sigma = D\varepsilon.$$

Модуль пружності D залежить від модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона, значення яких для віконного скла становили $65 \cdot 10^9$ Па та 0.23 відповідно.

Передавання звукової хвилі зі скла у повітряне середовище у верхній частині моделі задається граничною умовою, що пов'язує прискорення частинок скла з тиском:

$$a_n = n_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p_a \right),$$

де n_a – зовнішньоспрямований одиничний нормальний вектор з повітряного середовища.

Граничною умовою по краях скляної перегородки була умова жорсткої фіксації.

Дослідження проводились в діапазоні низьких та середніх частот $\Delta f = 25 \div 1400$ Гц.

3. ПОШИРЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У СИСТЕМІ ПОВІТРЯ – СКЛО – ПОВІТРЯ

Точкове джерело звуку створює акустичну хвилю в повітряному просторі, яка поширюється у всіх напрямках, відбивається від твердих поверхонь, у яких міститься скляна перегородка, та від самого скла, проникає крізь нього і поширюється поза його межами у відкритому просторі. На рис.2,а подано картину поля звукового тиску у системі

«відкритий простір – скляна перегородка – відкритий простір» на частоті 950 Гц.

Проходження хвиль звукового тиску через скляну перегородку породжує зміщення та пружні деформації у склі, що зумовлює виникнення у склі хвилі згину. Скло здійснює коливання, подібні до коливань мембрани (рис.2,б), хвиля згину містить непарну кількість півхвиль різної амплітуди і є симетричною відносно центру перегородки. Форма виниклої хвилі залежить від геометричних розмірів перегородки, а її частота збільшується з ростом частоти джерела звуку.

Колівання перегородки зумовлюють перевипроміннення звукової енергії назвоні. У межах перегородки містяться вторинні джерела випромінювання, кількість яких збільшується з ростом частоти хвилі згину.

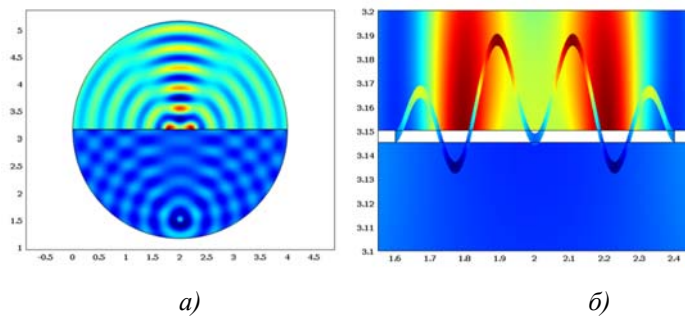


Рис.2. Картина поля звукового тиску у системі з перегородкою $80 \times 0,5 \text{ см}^2$ (а) та хвиля згину у склі (б) на частоті 950 Гц

Поза межами перегородки звукова хвиля поширюється типово для відкритого простору (не спрямована розбіжна хвиля, що має форму концентричних кіл), причому, у випадку декількох утворених вторинних джерел спостерігається інтерференційна картина поширення хвиль звукового тиску. При проходженні звукової хвилі через скляну перегородку відбувається різке зниження рівня звукового тиску на 30-50 дБ (рис.3).

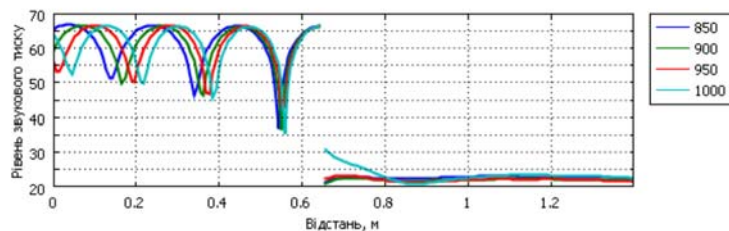


Рис.3. Просторова залежність рівнів звукового тиску через центр перегородки в системі відкритий простір – скляна перегородка – відкритий простір в діапазоні частот 850 – 1000 Гц

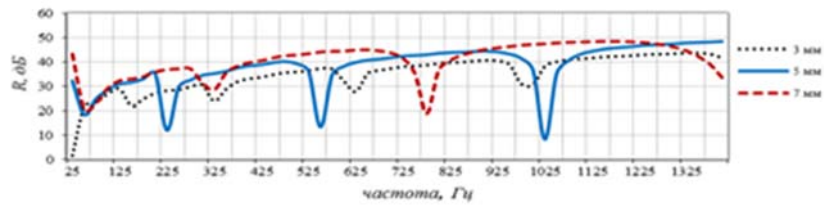
Моделювання показало, що із-за коливань скляної перегородки зниження рівня звукового тиску на різних частотах та у різних точках перегородки було різним. Тому на кожній частоті коефіцієнт ослаблення (звукоізоляції) R визначався як різниця інтегралів рівнів звукового тиску на межах скла, нормованих на одиницю довжини перегородки.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ СКЛЯНИХ ПЕРЕГОРОДОК

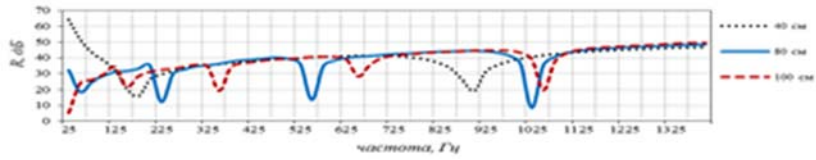
Обчислення частотних залежностей коефіцієнта звукоізоляції проводилось для скляної перегородки різної товщини (рис.4,а) та довжини (рис.4,б).

Як видно з рис.4,а, коефіцієнт звукоізоляції зростає рівномірно з ростом частоти за винятком частот пониженої ізоляції. Зі збільшення товщини скла збільшується значення коефіцієнта звукоізоляції, змінюються частоти впадин та зменшується їх кількість у досліджуваному діапазоні частот.

Дослідження коефіцієнта звукоізоляції для скляних перегородок різної довжини (рис. 4,б), показали що значення коефіцієнта є однаковим за однакової товщини скла, але змінюються частоти зниженої звукоізоляції та зростає їх кількість зі збільшенням довжини у досліджуваному діапазоні частот.



а)



б)

Рис.4. Звукоізоляція скляної перегородки довжиною 0,8 м різної товщини (а) та товщиною 5 мм різної ширини (б)

Відомо, що звукоізоляція перегородок різко знижується на частотах просторового резонансу, тому фізико-технічним моделюванням обчислені власні частоти перегородок (табл.1).

Таблиця 1

Власні частоти скляної перегородки різних геометричних розмірів [Гц]

40×0,5 см ²	80×0,5 см ²	100×0,5 см ²	80×0,3 см ²	80×0,5 см ²	80×0,7 см ²
166	42	26	25	42	58
458	115	73	69	115	161
896	225	144	135	225	315
	372	238	223	372	520
	555	355	333	555	776
	774	496	466	774	1083
	1030	661	620	1030	
	1321	848	796	1321	
		1059	994		
		1293	1214		

Кількість власних частот у досліджуваному діапазоні збільшується зі збільшенням довжини і зі зменшенням товщини перегородки. Порівняння обчислених власних частот з частотами впадин на рис.4 показало, що не всі, а тільки перша і кожна друга з власних частот є частотами просторового резонансу, на яких виникає стояча хвиля у скляній перегородці. На рис. 5,а показано хвилю згину на частоті просторового резонансу, формування якої зумовлює різке зниження звукоізоляції перегородки, і на наступній власній частоті, на якій просторового резонансу не виникає (рис.5,б), і звукоізоляція залишається великою.

Визначення частот просторового резонансу дає змогу пояснити різне значення зниженої звукоізоляції на рис.4. Оскільки обчислення частотних залежностей коефіцієнта звукоізоляції проводилося з достатньо великим кроком (25 Гц), то різна глибина впадин на рис.4 пояснюється різною віддаленістю точки обчислення від частоти просторового резонансу.

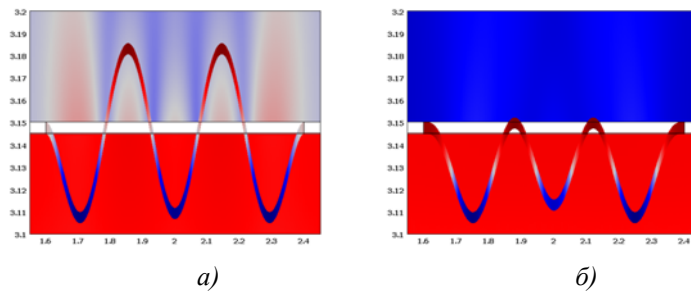


Рис.5. Картина поля рівня звукового тиску у системі та хвиля згину у перегородці $80 \times 0,5 \text{ см}^2$ на частоті просторового резонансу 555 Гц (а) та власній частоті 774 Гц (б)

Обчислення власних частот скляних перегородок не потребує моделювання складної геометрії і не вимагає великої кількості комп'ютерної пам'яті і розрахункового часу.

5. ПОРІВНЯННЯ З РЕЗУЛЬТАТАМИ СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ТА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ

Обчислені частотні залежності коефіцієнта звукоізоляції скла порівнювались з залежностями, отриманими з використанням статистичної теорії поширення звуку [3,4].

На рис.6 подані частотні залежності звукоізоляції скляної перегородки товщиною 5 мм, обчислені фізико-технічним моделюванням та нескінченної скляної перегородки такої ж товщини, розраховані за статистичною теорією.

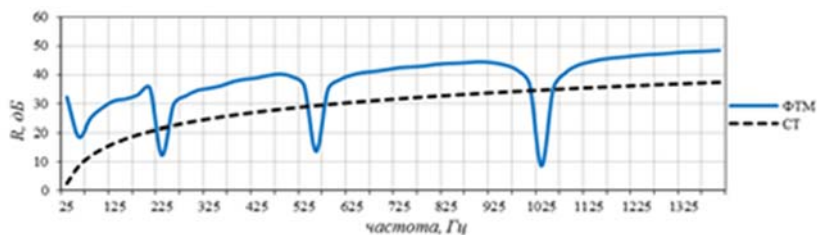


Рис.6. Частотна залежність коефіцієнта звукоізоляції скляної перегородки, розрахована за статистичною (СТ) та фізико-технічним моделюванням (ФТМ)

Коефіцієнт звукоізоляції зростає з частотою в обох випадках, однак його значення, отримане моделюванням, є на ~10 дБ більшим на міжрезонансних частотах, ніж розраховане за статистичною теорією. Крім того, отримані моделюванням залежності виразно демонструють зниження звукоізоляції на частотах просторового резонансу скляної перегородки, що краще відображає процеси, що відбуваються у перегородці при проходженні через неї звуку.

Для порівняння результатів фізико-технічного моделювання з результатами статистичної теорії та вимірними значеннями звукоізоляції [2,7], у табл.2 подані усереднені значення коефіцієнта звукоізоляції в 4-х октавних смугах у ділянці низьких та середніх частот.

З таблиці 2 видно, що значення коефіцієнта звукоізоляції за результатами фізико-технічного моделювання є вищими на 6–15 дБ в порівнянні з результатами статистичної теорії у досліджуваному діапазоні частот, причому різниця зменшується зі зростанням частоти та зі збільшенням товщини скла. Значення коефіцієнта звукоізоляції за даними [2,7] перебувають між результатами фізико-технічного моделювання та статистичної теорії у ділянці низьких частот та є нижчими від результатів статистичної теорії у ділянці середніх частот. Відмінності у результатах хвильової та статистичної теорій, ймовірно, можуть бути пов'язаними з тим, що статистична теорія не враховує скінченності довжини перегородки, а також з наближеннями, які

припускаються для отримання виразів, придатних для інженерних розрахунків.

Таблиця 2

Усереднені значення коефіцієнта звукоізоляції за результатами фізико-технічного моделювання (ФТМ), статистичної теорії (СТ) та результати вимірювань (В)

Товщина скла	Звукоізоляція в октавних смугах частот, дБ											
	125 Гц			250 Гц			500 Гц			1000 Гц		
	ФТМ	СТ	В	ФТМ	СТ	В	ФТМ	СТ	В	ФТМ	СТ	В
3 мм	25	10	17	28	18	17	34	24	22	40	30	28
4 мм	26	14	18	30	21	23	36	27	26	41	33	31
5 мм	29	16	-	31	23	-	37	29	-	43	35	-
6 мм	30	18	22	34	24	22	40	30	26	43	36	30
7 мм	30	19	-	35	25	-	42	32	-	44	38	-

З таблиці видно, що значення коефіцієнта звукоізоляції, отримані експериментальним шляхом є ближчими до значень, розрахованих згідно з статистичною теорією, однак, при вимірюваннях звукоізоляції вікон завжди є нещільності, нежорсткі закріплення вікон, що впливає на збільшення ймовірності проникнення звуку і на отримання менших значень звукоізоляції.

Тому обчислення отримані фізико-технічним моделюванням вказують на ту межу, якої можна досягти за особливо ретельного встановлення вікон. На те вказують і вищі значення звукоізоляції, ніж передбачувані статистичною теорією, в ділянці низьких частот.

6. ВИСНОВКИ

Результати моделювання, подані в роботі, наочно демонструють процес проходження звукових хвиль через скляну перегородку, формування у ній хвилі згину. Результати обчислення коефіцієнта

звукоізоляції скляної перегородки різних розмірів у діапазоні низьких та середніх частот показують, що коефіцієнт ізоляції зростає зі збільшенням частоти і товщини скляних перегородок, і різко зменшується на частотах просторового резонансу.

Показано, що статистична теорія дає занижені результати звукоізоляції віконних перегородок і не відображає ефекту зниження звукоізоляції на частотах просторового резонансу. Однак, вони відображають загальну тенденцію зростання звукоізоляції, і можуть бути використаними з поправкою у 10 дБ. Нижчі значення звукоізоляції вікон, отримані вимірюваннями, можуть свідчити про можливий вплив приміщень, у яких вони встановлені, а також про якість їх кріплення та ущільнення.

Визначені частоти просторового резонансу у перегородках різних розмірів. Показано, що їх обчислення за допомогою фізико-технічного моделювання не потребує побудови частотних залежностей, є швидким, і дає можливість оперативно виявляти зменшення звукоізоляції скляних перегородок в широкому діапазоні частот.

1. *Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов/ Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мецераков Р.В. и др.; под. ред. А.П. Зайцева, А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение» , 2009 – 508 с. 2. Халятин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с. 3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978 – 448 с. 4. В.И. Заборов Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 187с. 5. Acoustics Module User's Guide © COPYRIGHT 1994–2008 by COMSOL AB. Version: September 2008 COMSOL 3.5. – 272 p. 6. Kenyo H., Lyubchik Y. Model of acoustic and vibroacoustic information leakage through a glass window in a protected room // Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists CSE- 2013 - p. 62-65. 7. А.А. Торокин. Инженерно-техническая защита информации – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.*