

УДК 621.395

Г.В. Кеньо, Ю.Р. Любчик

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

ЗВУКОІЗОЛЯЦІЯ ВІКОННИХ СКЛОПАКЕТІВ

В роботі подана фізико-технічна модель подвійної скляної конструкції з повітряним прошарком (склопакету). Методом кінцевих елементів обчислено акустичне поле системи повітря – склопакет – повітря, досліджено процес поширення звукових хвиль в системі. Обчислено частотні залежності коефіцієнта звукоізоляції склопакетів різної геометрії в діапазоні низьких частот. Проведено дослідження впливу геометричних розмірів скла та товщини повітряного прошарку на значення коефіцієнта звукоізоляції. Визначено швидкість зростання усередненого значення коефіцієнта звукоізоляції в чотирьох октавних смугах.

Ключові слова: склопакети, коефіцієнт звукоізоляції, частотні залежності звукоізоляції.

Вступ

Вікна є найслабшою ланкою огорожувальних конструкцій із-за малої масивності, прозорості та інших вимог, що ставляться до комфортності праці, що зумовлює інтерес зловмисників до експлуатації цього каналу витоку інформації. Сучасні вимоги до зменшення втрат теплової енергії з приміщень привели до використання пластикових віконних конструкцій зі склопакетами, що разом з практичністю, функціональністю і довговічністю, дозволяє значно покращити і звукоізоляцію. Проте аналітичний розрахунок звукоізоляції склопакетів є доволі наближеним із-за складності математичного опису хвильових процесів, що відбуваються у конструкціях такого типу. Це, своєю чергою, зумовлює актуальність використання лабораторних вимірювань, які є затратними, і вимагають додаткових заходів щодо усунення небажаного впливу зовнішніх факторів. Віконні конструкції виготовляються певних геометричних розмірів, а встановлюються у різних приміщеннях будівель, розташованих у різному доквіллі. Тому важливим завданням є визначення власних звукоізоляційних властивостей склопакетів, щоб, з урахуванням місця встановлення, можна було реально оцінити і передбачити витік через них конфіденційної інформації.

Короткий огляд публікацій за темою. Практичні методи розрахунку звукоізоляції базуються на вирішенні задачі проходження звукових хвиль через нескінченний тонкий шар з урахуванням дифузного поля у приміщенні. Частотна залежність звукоізоляції описується законом мас та явищем співпадіння на частотах вищих від граничної, а зростання звукоізоляції відбувається з різною швидкістю у відповідних частотних ділянках [1, 2]. У випадку подвійної конструкції з повітряним прошарком звукоізоляція додатково збільшується у вказаних частотних діапазонах, і на частотах, при яких довжина хвиль є меншою від шестикратної товщини прошарку, зникає залежність звукоізоляції від величини цього прошарку.

В роботі [3] пропонується модель, що ґрунтується на принципі самоузгодження звукових полів перед і за огороженням з хвильовим полем самого огороження. Проходження звуку через подвійне огороження певних розмірів з закріпленими краями здійснюється за рахунок резонансних та інерційних коливань обох пластин та через повітряний прошарок як самостійні структури, так і через всю конструкцію в цілому. Розрахунок частотної залежності коефіцієнта звукоізоляції полягає у визначенні граничних частот характерних ділянок та у виявленні вкладу резонансних та інерційних складових проходження звуку у цих ділянках. Як і у попередніх роботах, розрахована залежність є плавною у широкому діапазоні частот, хоча відомим фактом є існування ділянок зниженої звукоізоляції в одношарових скляних перегородках із заданими геометричними розмірами на частотах, які визначаються власними частотами перегородки з фіксованими краями [4]. Склопакет, як складніша конструкція, припускає прояв додаткових процесів, які відбуваються при проходженні через нього звуку, що повинно відобразитись і на частотній залежності його звукоізоляції. Тому метою роботи є обчислення методом кінцевих елементів коефіцієнта звукоізоляції склопакету та його частотної залежності шляхом моделювання акустичного поля системи відкритий простір – склопакет – відкритий простір в середовищі фізико-технічного моделювання COMSOL Multiphysics.

Обґрунтування моделі та методу обчислень

Схема моделі сучасного пластикового вікна з ПВХ-профілем та звичайним склопакетом показана на рис. 1. Модель складається із двох шиб зі скла (1), розділених дистанційною рамкою (2), які утворюють камеру, заповнену повітрям; по краях камера наповнена осушувачем (3); скло закріплюється у віконну конструкцію за допомогою герметика (4), а ПВХ-профіль (5) містить декілька камер для забезпечення теплоізоляції.

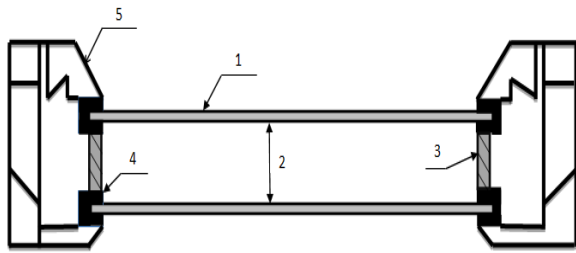


Рис. 1. Схематичне зображення моделі пластикового вікна

Межі камер ПВХ-профілю можна вважати абсолютно відбивальними, жорстко закріпленими поверхнями, тому вони не будуть мати значного впливу на поширення звукової хвилі через склопакет. Як осушувач використовують молекулярні сита, які мають багато пор, що значно ускладнює побудову моделі склопакету, проте практично не впливає на поширення звуку, оскільки молекулярне сито відділене від повітряного прошарку дистанційної рамки алюмінієвою пластиною, яку теж можна вважати жорсткою поверхнею. Тому для дослідження поширення звукових хвиль через пластикові вікна та визначення його звукоізоляційних властивостей і скорочення часу обчислення, конструкцію пластикового вікна було спрощено до конструкції (рис. 2), яка складається з шиб зі скла (2), закріплених герметиком (1) та розділених дистанційною рамкою, заповненою повітрям (3).

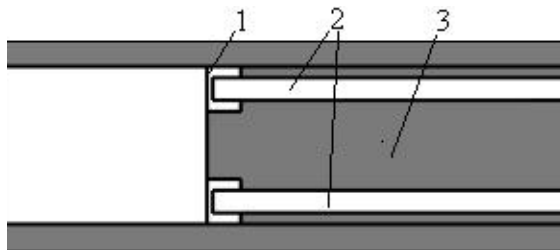


Рис. 2. Фрагмент моделі пластикового вікна

Дослідження поширення звукових хвиль, породжених точковим джерелом звуку, проводились на двовимірній моделі системи «відкритий простір – склопакет – відкритий простір» (рис. 3), шляхом моделювання 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. Вважаємо, що поверхні, у яких міститься склопакет, повністю відбивають хвилі.

На межах півкругів, що представляють відкритий простір, задається гранична умова випромінювання хвиль [4, 6].

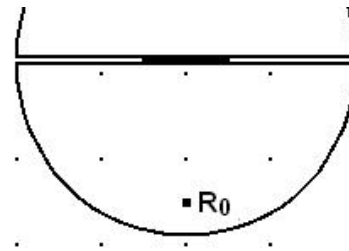


Рис. 3. Фрагмент моделі системи «відкритий простір – склопакет – відкритий простір»

Напруження на поверхнях скла при передаванні звукової хвилі з повітряного середовища задається навантаженням F , яке визначається акустичним тиском хвилі, породженої джерелом:

$$F = -n_s p_a,$$

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

Напруження σ у твердому середовищі (скло, герметик) пов'язані з деформаціями ϵ співвідношенням:

$$\sigma = D\epsilon.$$

Модуль пружності D залежить від модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона, значення яких для віконного скла вибираємо $65 \cdot 10^9$ Па та 0,23, а для герметика – $8 \cdot 10^6$ Па та 0,46 відповідно.

Передавання звукової хвилі зі скла у повітряне середовище задається граничною умовою, що пов'язує прискорення частинок скла з акустичним 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 склопакету була умова жорсткої фіксації.

Для проведення обчислень методом кінцевих елементів була згенерована неструктурована сітка з розміром кінцевого елемента, який задовольняє критерію Найквіста. Для обчислення звукового поля з джерелом звуку був вибраний параметричний обчислювач лінійних систем методом GMRES (узагальненим методом мінімальних неув'язок) з геометричним багатосітковим згладжувачем, який забезпечує низьке споживання пам'яті та високу роздільну здатність сітки, і рекомендується для використання при обчисленні великих задач акустики [5].

Дослідження проводились на моделях склопакетів різної геометрії в діапазоні частот перших чотирьох октавних смуг звукового діапазону $\Delta f=90-1400$ Гц з кроком 10 Гц.

Результати та їх обговорення

Хвиля звукового тиску, потрапляючи на перешкоду склопакету, частково відбивається від неї, що видно з інтерференційної картини поля звукового

тиску у повітряному півпросторі з джерелом звуку (нижня частина рис. 4, а), зумовлює формування хвилі згину у ближньому склі. Далі відбувається перевипромінювання звукової хвилі у повітряний простір камери, де, внаслідок відбивання від поверхонь камери, у ній формується звукове поле, подібно до поля в замкнутому просторі, і одночасно формується хвиля згину зовнішнього скла (рис. 4, б). Як правило, амплітуда хвилі згину зовнішнього скла є меншою, ніж ближчого до джерела, відповідно, у повітряний простір поза склопакетом перевипромінюється звукова хвиля меншої інтенсивності, що зумовлює там суттєво нижчий рівень звукового тиску (верхня частина рис. 4, а).

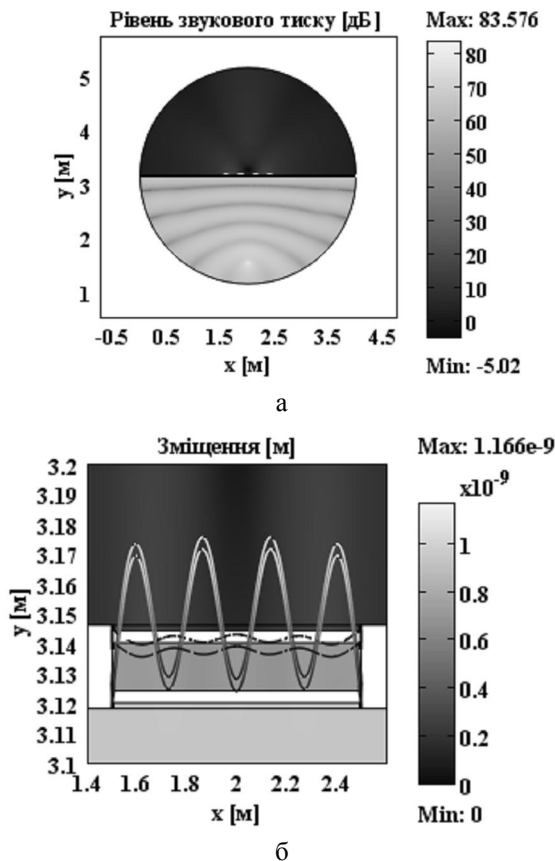


Рис. 4. Поле рівня звукового тиску у повітряному середовищі системи (а) та хвиля згину у шибках склопакету із формулою 4-16-4 [мм] (б) на частоті 500 Гц

Таким чином, склопакету, як і будь-якій суцільній перешкоді, притаманні звукоізоляційні властивості. Для визначення звукоізоляції склопакету проводилось обчислення питомого інтегрального рівня звукового тиску на зовнішніх межах ближчого до джерела звуку та дальшого від нього скла, а коефіцієнт ослаблення (звукоізоляції) R визначався як різниця значень цих величин.

На рис. 5 показано частотну залежність коефіцієнта звукоізоляції пластикового вікна з типовою формулою склопакету 4-16-4 [мм] (суцільна лінія); для порівняння поруч зображена частотна залеж-

ність скляної перегородки товщиною 4 мм (пунктирна лінія) [4].

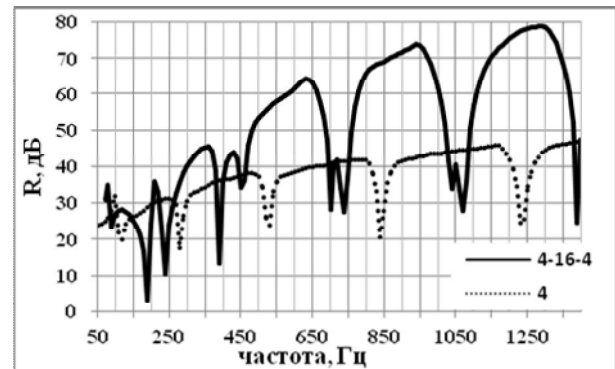


Рис. 5. Коефіцієнт звукоізоляції склопакету 4-16-4 [мм] та скляної перегородки товщиною 4 мм

Як видно з рисунку, коефіцієнт звукоізоляції склопакету є більшим, ніж скляної перегородки, зростає зі збільшенням частоти швидше, існує більша кількість частотних інтервалів, на яких відбувається його різке зниження (впадини на графіку). Для виявлення впливу геометрії конструкції та розуміння причин виникнення ділянок зниженої ізоляції досліджувались склопакети з різною товщиною камери та різною геометрії скла.

На рис. 6 показано частотні залежності коефіцієнта звукоізоляції склопакетів з формулами 4-16-4, 4-20-4 та 4-24-4 для виявлення впливу товщини повітряного прошарку.

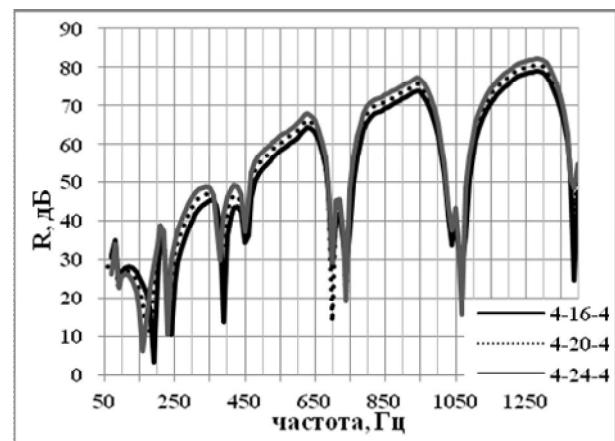


Рис. 6. Частотна залежність коефіцієнта звукоізоляції склопакетів із формулами 4-16-4, 4-20-4 та 4-24-4 [мм]

З графіків видно, що зміна товщини повітряного прошарку практично не впливає на вигляд частотної залежності за винятком впадин у діапазоні частот 150÷200 Гц. Зі збільшенням товщини повітряного прошарку на кожні 4 мм впадина цього діапазону зміщується на ~15 Гц у сторону низьких частот. Значення коефіцієнта звукоізоляції на плавних ділянках графіків при цьому є дещо більшим у всьому досліджуваному частотному діапазоні.

Дослідження частотних залежностей коефіцієнта звукоізоляції склопакетів з однаковою товщиною камери і товщинами скла 5 та 6 мм виявили схожі закономірності.

Вплив товщини скла в конструкції на звукоізоляцію показано на прикладі частотних залежностей коефіцієнта звукоізоляції склопакетів з формулами 4-16-4 та 5-16-5 [мм] (рис. 7).

З рисунка видно, що зі збільшенням товщини скла звукоізоляція склопакету на нижчих частотах збільшується, а на вищих частотах виявлення впливу ускладнюється із-за існування впадин у різних частотних ділянках.

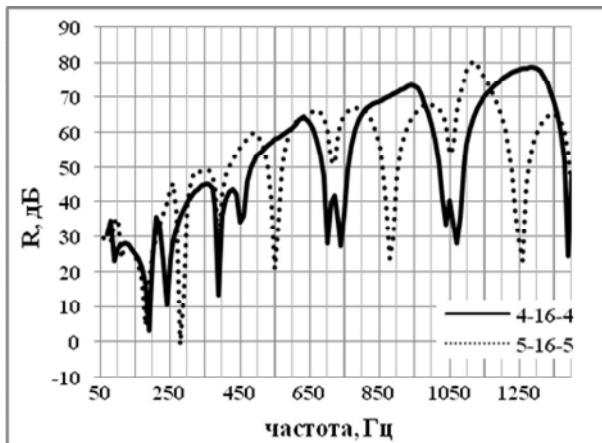


Рис. 7. Частотні залежності коефіцієнта звукоізоляції склопакетів із формулами 4-16-4 та 5-16-5 [мм]

Оскільки відомо, що частоти просторового резонансу скла різної товщини є різними [4], то різниця між частотними залежностями виглядає закономірною.

Проте деякі з впадин розташовані на близьких частотах (~170, 370, 700, 1050 і 1400 Гц), що може пояснюватись впливом камери. А з огляду на те, що на залежностях склопакетів з формулами 4-20-4, 5-20-5 та 6-20-6 [мм] та з формулами 4-24-4, 5-24-5 та 6-24-6 [мм] також є впадини на таких самих частотах, можна припустити однаковий вплив власне довжини камери. Тому наступні дослідження полягали у виявленні такого впливу.

Порівнювались частотні залежності коефіцієнта звукоізоляції із однаковими формулами склопакетів довжиною 1 та 0.8 м (рис. 8).

Як видно із графіку, зниження звукоізоляції відбувається на зовсім інших частотах, що виглядає закономірним, оскільки відомо, що частоти просторового резонансу скла різної довжини є різними. Той факт, що на графіку нема впадин на однакових частотах, говорить про те, що в камерах з повітрям різної довжини по-різному створюються умови для проходження хвиль та виникнення резонансу в системі.

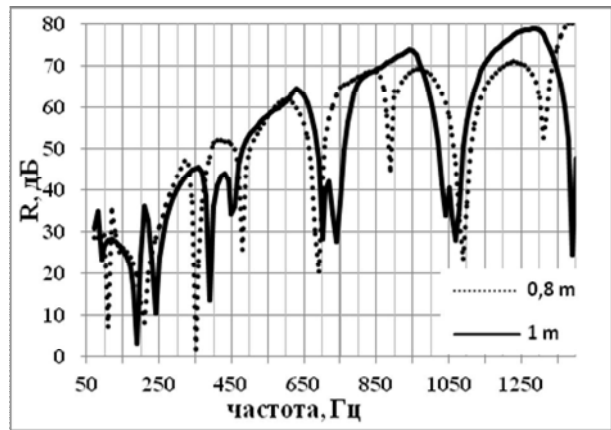
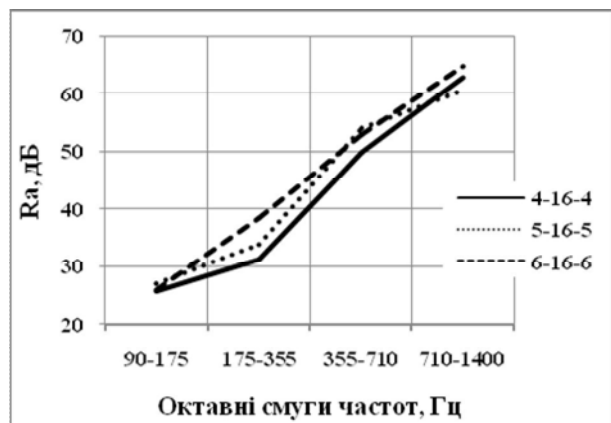


Рис. 8. Частотна залежність коефіцієнта звукоізоляції склопакетів із формулою 4-16-4 [мм] та довжиною 0.8 і 1 м

Для кількісного оцінювання коефіцієнта звукоізоляції склопакетів різної геометрії, обчислювались його усереднені значення (R_a) у чотирьох перших октавних частотних смугах звукового діапазону (рис. 9).



а



б

Рис. 9. Усереднені значення коефіцієнта R_a склопакетів з різним повітряним прошарком, і скляної перегородки (а) та з різною товщиною скла (б) у перших чотирьох октавних смугах частот

Для порівняння на рис. 9, а подана зміна R_a на октаву і для скляної перегородки (штрих-пунктирна лінія).

В середньому коефіцієнт звукоізоляції досліджуваних склопакетів зростає на $11 \div 15$ дБ/октаву, тоді як скляної перегородки (рис. 9, а) – на 5,3 дБ.

Для більшості склопакетів швидкість зростання була не однакою як на нижчих, так і на вищих частотах.

Порівняння усереднених значень коефіцієнта звукоізоляції у всьому досліджуваному діапазоні показало, що збільшення товщини камери на 4 мм приводить до збільшення звукоізоляції на $\sim 1,5$ дБ, а збільшення товщини скла на 1 мм зумовлює зростання на $1 \div 1,2$ дБ.

Висновки

Результатом виконаної роботи є створення обґрунтованої фізико-технічної моделі склопакету, яка дає змогу досліджувати процеси поширення звукових хвиль у системі повітря – склопакет – повітря та визначати параметри і характеристики склопакетів.

У результаті досліджень частотних залежностей коефіцієнта звукоізоляції склопакетів різної геометрії показано, що:

- зростання величини коефіцієнта ізоляції склопакету з частотою відбувається швидше, ніж у скляній перегородці;
- існують частоти зниженої звукоізоляції, які залежать від товщини скла та довжини склопакету і практично не залежать від товщини повітряного прошарку, а їх кількість є удвічі більшою, ніж у скляній перегородці;
- зі збільшенням товщини скла у склопакеті коефіцієнт його звукоізоляції зростає;

- збільшення товщини повітряного прошарку підвищує звукоізоляційну здатність склопакету у всьому діапазоні частот.

Обчислені усереднені значення звукоізоляції пластикових вікон загалом є вищими за відомі дані лабораторних вимірювань, що ймовірно зумовлено особливостями методик вимірювань.

Список літератури

1. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В.И. Заборов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 187 с.
2. Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies / L. Cremer, M. Heckl, Bjorn A.T. Petersson. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005. – 608 p.
3. Звукоизоляция и звукопоглощение / Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др. – М.: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2004. – 450 с.
4. Кеньо Г.В. Поширення звуку через скляні перегородки та визначення їх звукоізоляції / Г.В. Кеньо, Ю.Р. Любчик // Збірник наукових праць Української академії друкарства “Комп’ютерні технології друкарства”. – 2014. – № 31. – С. 75-84.
5. Acoustics Module User's Guide © COPYRIGHT 1994–2008 by COMSOL AB. Version: September 2008 COMSOL 3.5. – 272 p.
6. Kenyo H. Model of acoustic and vibroacoustic information leakage through a glass window in a protected room / H. Kenyo, Y. Lyubchik // Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists CSE- 2013. – P. 62-65.

Надійшла до редколегії 12.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Хома, Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОКОННЫХ СТЕКЛОПАКЕТОВ

Г.В. Кеньо, Ю.Р. Любчик

В работе представлена физико-техническая модель двойной стеклянной конструкции с воздушным промежутком (стеклопакета). Методом конечных разностей рассчитано акустическое поле системы воздух – стеклопакет – воздух, исследовано процесс распространения звуковых волн в системе. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента звукоизоляции стеклопакетов разной геометрии в диапазоне низких частот. Проведено исследование влияния геометрических размеров стекла и толщины воздушного промежутка на значение коэффициента звукоизоляции. Определена скорость роста усредненного значения коэффициента звукоизоляции в первых четырех октавных полосах.

Ключевые слова: стеклопакеты, коэффициент звукоизоляции, частотные зависимости звукоизоляции.

SOUNDPROOFING OF WINDOW INSULATING GLASS

H.V. Kenyo, Yu.R. Liubchik

This work represents physical-technical model of the double glass construction with an air gap (insulating glass). By finite difference method the acoustic field of system "air - glass - air" was calculated and the process of propagation sound waves in this system was investigated. Also dependence of soundproofing coefficient of insulated glass with different geometric parameters in the low frequency range frequency was calculated. The influence of geometric parameters of glass and thickness of air gap on the value of soundproofing coefficient was investigated. The rate of growth of the average values of soundproofing coefficient in the first four octave bands was determined.

Keywords: insulating glass, soundproofing coefficient, frequency dependence of soundproofing.