Issue 6

https://doi.org/10.23939/sisn2019.02.052

УДК 534.843:004.9

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПОТОКУ ПОВІТРЯ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗВУКОПОГЛИНАННЯ

М. Р. Мельник[1], А. Б. Керницький[1], Ярослав Рубаха[2], Тадеуш Камісінські[2]

[1] Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра систем автоматизованого проєктування
MelnykMR@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8593-8799
andriy.b.kernytskyy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-8188-559X
[2] Краківська гірничо-металургійна академія ім. С. Сташіца, Польща,
jrubacha@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7624-8879
kamisins@agh.edu.pl, ORCID: 0000-0002-8580-2402

© Мельник М. Р., Керницький А. Б., Рубаха Я., Камісінські Т., 2019

Подано розроблене у системі Labview програмне забезпечення для автоматизації процесу розрахунку опору потокові повітря пористих матеріалів. Підхід полягає в автоматизованому збиранні та опрацюванні інформації із давача тиску та витратоміра. Розроблене програмне забезпечення дало змогу автоматизувати процес визначення коефіцієнтів звукопоглинання пористих матеріалів методом продування потоком повітря. Програмне забезпечення дає змогу виконувати аналіз даних у режимі реального часу. Співвідношення між зміною тиску і потоком повітря подано у вигляді графіка. Це дає змогу в реальному часі оцінити достовірність вимірювань. Описано процедуру та методи вимірювань. Викладено розроблений та реалізований метод визначення опору потоку повітря на основі коефіцієнтів поглинання звуку, що дало змогу порівняти результати, отримані з імпедансної трубки та лабораторної установки для визначення опору потоку повітря методом продування, порівнюючи тільки значення опору повітря, а не функцію залежності коефіцієнта поглинання від частоти. Для обчислення коефіцієнта звукопоглинання вибрано емпіричну модель Мікі, яка є модифікацією моделі Ділейні–Базлі, але, на відміну від останньої, виключає виникнення від'ємних значень коефіцієнта звукопоглинання на низьких частотах. Для перевірки методів значення опору потокову повітря визначено трьома способами: обчислено в результаті експерименту, з використанням лінійного наближення для всього набору даних й за допомогою запропонованого методу. На прикладі меламінової піни показано, що запропонований спосіб дає змогу краще зіставити регресійну пряму із експериментальними даними, а це, своєю чергою, дає можливість мінімізувати похибку вимірювання порівняно із раніше використовуваним методом.

Ключові слова: імпедансна трубка, коефіцієнти звукопоглинання, опір повітряному потокові, звукопоглинальні матеріали, питомий опір повітряного потоку.

Вступ

Пористі матеріали часто використовують для побудови акустичних систем та звукової адаптації приміщень завдяки їхнім відмінним звукопоглинальним властивостям на середніх і високих частотах. Ці матеріали характеризуються тим, що вони мають сітку взаємопов'язаних

пор невеликих розмірів, у яких ефекти, пов'язані із в'язкістю потоку, зумовлюють перетворення акустичної енергії хвилі на тепло. До них належать мінеральна та скляна вати, мочалки, тканини тощо.

Основним параметром, що описує звукопоглинальні властивості матеріалів, є коефіцієнт звукопоглинання. Волес Сабін визначив його як частину енергії, що падає на поверхню і не відбивається:

$$\alpha = 1 - \frac{E_{від.}}{E_{пад.}}, \quad (1)$$

де $E_{від.}$ – акустична енергія відбитої хвилі; $E_{пад.}$ – акустична енергія хвилі, що падає.

Коефіцієнт поглинання звуку можна визначити на основі вимірювань в імпедансній трубці методом стоячої хвилі [1] або методом функції переходу [2].

Коефіцієнт поглинання також можна визначити на основі вимірювань у ревербераційній камері [3]. Цей метод дає змогу вимірювати як плоскі матеріали, так і просторові звукопоглинальні елементи, наприклад, крісла для глядачів [4]. Однак для цієї процедури потрібні дорогі та спеціалізовані вимірювальні приміщення. Альтернативою методам вимірювання є обчислення значення коефіцієнта звукопоглинання за допомогою емпіричних моделей. Ці моделі запропоновано на основі численних вимірювань матеріалів або опису фізичних процесів всередині матеріалу. Найпростіші емпіричні моделі Ділейні–Базлі [5] та Мікі [6, 7] вимагають тільки значення опору потоку повітря. Точніші фізичні моделі, наприклад, Шампу–Алларда [8], також потребують багатьох інших параметрів, які здебільшого лише приблизні. Це означає, що чим точніша модель, тим гірша точність вхідних параметрів, що призводить до помилок, які важко оцінити.

У статті описано модернізований лабораторний стенд для вимірювання опору потокові повітря пористих матеріалів. Опір потокові є одним з основних параметрів, що характеризує пористі та волокнисті матеріали. Він є вхідним параметром для моделей обчислення коефіцієнта звукопоглинання одношарових та багатошарових матеріалів за допомогою функції матриці передачі [9]. Його можна також використовувати для обчислення коефіцієнта звукопоглинання матеріалів із покриттями [10]. Методи вимірювання опору потоку описано в стандарті [11]. Виокремлено два методи: статичний та динамічний.

Метою виконаного дослідження є автоматизація процедури вимірювання опору потоку на спроєктованій лабораторній установці. Перевірку виконано на основі порівняння виміряних значень опору потоку зі значеннями, отриманими вимірюванням в імпедансній трубці, а значення опору потоку вибирали так, щоб вони відповідали значенням коефіцієнта звукопоглинання.

Для обчислення коефіцієнта звукопоглинання вибрана емпірична модель Мікі, що є модифікацією моделі Ділейні–Базлі, в якій унеможливлено виникнення від'ємних значень коефіцієнта звукопоглинання на низьких частотах. Додатковою перевагою цієї моделі є той факт, що вона вимагає лише значення опору повітряного потоку для обчислення характеристичного опору матеріалу та хвильового числа матеріалу.

Лабораторний стенд для вимірювання опору повітряного потоку

Лабораторний стенд до модифікації був оснащений цифровим дисплеєм, з якого зчитували значення вимірюваних параметрів, такі як тиск і потік повітря. Потрібні були численні вимірювання, щоб отримати точні результати, і як наслідок, на це витрачали багато часу. Важливим обмеженням також був різницевий манометр Dwyer 475-000-FM, точність якого становила 0,5 % повної шкали (від 0 до 250 Па), а більшість вимірювань здійснюються за тиску, що не перевищує 50 Па.

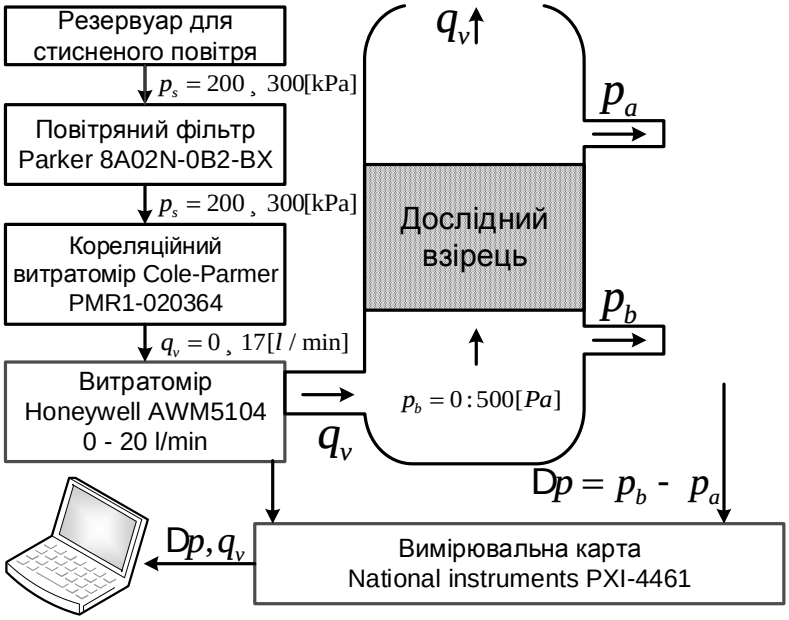


Рис. 1. Схема вимірювального стенда

Рис. 2. Лабораторний стенд для вимірювання опору потокові повітря пористих матеріалів

Через всі вищезгадані причини було запропоновано модернізацію лабораторного стенда. Основною модифікацією була комп'ютеризація збирання даних та їх обчислень. Точність вимірювання також була підвищена за рахунок використання давача вужчого діапазону. Запропоновано використовувати багатодіапазонний давач тиску Sontay PA-60-2-HA, точність якого ±1 % від усієї шкали, що дорівнює $50 \times 0,01 = \pm 0,5[Pa]$. Для автоматичної реєстрації потоку повітря використано витратомір Honeywell 5104VN, похибка читання якого становить максимум ± 3 %, а гістерезис ± 0,5 %.

Запропоновану схему модернізації стенда для вимірювання опору повітряного потоку показано на рис. 1, а його фото наведено відповідно на рис. 2. Модернізація стенда дала змогу досягти більшої точності завдяки використанню точніших давачів. Автоматичне керування за допомогою комп'ютерної програми дасть змогу виконати більше вимірювань для одного зразка й отримати більше результатів, усереднення яких дасть змогу підвищити точність.

Процедура вимірювання

Метод, який використовують для перевірки опору повітряного потоку пористих матеріалів, – це метод постійного потоку повітря (вказаний у стандарті ДСТУ EN 29053:2019 [11]). Він полягає у контрольованому односпрямованому проходженні повітря через тестовий зразок і вимірюванні різниці тиску перед зразком, після зразка й одночасному вимірюванні витрат повітря.

Рекомендується виконувати вимірювання за найменшої можливої лінійної швидкості потоку повітря u = 0,5 мм/с. Падіння тиску слід вимірювати за цього значення або поступово зменшуючи потік повітря до граничного значення його лінійної швидкості. На основі отриманої діаграми опір потоку можна визначити як значення для u = 0,5 мм/с за допомогою графіка усереднення, або, за необхідності, – екстраполяцією до цього значення.

Нижче наведено процедуру визначення опору повітряного потоку пористого матеріалу:

· зчитування та збереження каталожних даних зразка, а саме: марка, компанія, густина, вага, товщина тестового зразка (якщо не вказано, необхідно виміряти товщину зразка);

· розташування досліджуваного зразка у вимірювальній трубці;

· перевірка правильності герметизації країв зразка (для жорстких зразків необхідно використовувати герметик для герметизації країв);

· вимірювання барометричного тиску у вимірювальній трубці над тестовим зразком (використовується для обчислення точної швидкості звуку в повітрі);

· вимірювання температури у вимірювальній трубці над тестовим зразком (використовується для обчислення точної швидкості звуку в повітрі);

· підключення повітряного контейнера до регулятора потоку повітря та встановлення мінімального потоку;

· реєстрація потоку повітря та падіння тиску, допоки взаємозалежності, як на рис. 3, не почнуть стабілізуватися. На цей момент стабілізації вказує стрілка. Для точніших результатів рекомендується змінювати потік повітря як вгору, так і вниз.

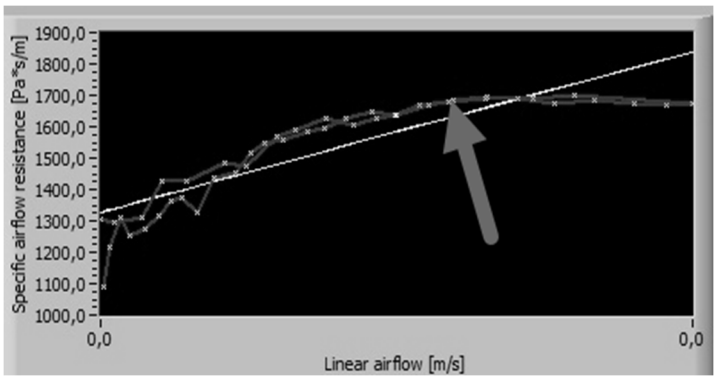


Рис. 3. Зв'язок між лінійним потоком повітря та питомим опором повітряного потоку

Метод вимірювання

Визначаючи опір повітряного потоку, вимірюють такі значення:

· атмосферний тиск всередині вимірювальної трубки над досліджуваним зразком;

· температура всередині вимірювальної трубки над досліджуваним зразком;

· товщина зразка;

· об'ємна швидкість потоку повітря (для вищої точності вхідні параметри знаходять в одиницях давачів, а формули для цього коригують) – за допомогою давача потоку повітря Honeywell AWM5104;

· падіння тиску до та після зразка за допомогою давача тиску Sontay PA-60-2-HA.

Математичне забезпечення

Для забезпечення більшої точності формули для обчислення лінійного потоку й опору потоку повітря коригували до одиниць давача тиску, який використовується. Діаметр вимірювальної трубки на стенді такий самий, як діаметр імпедансної трубки, і дорівнює 100 мм, що дає змогу порівняти зразки, випробувані як на запропонованому вимірювальному стенді, так і в імпедансній трубці. Модифіковані формули наведено нижче:

- формула для визначення лінійного потоку повітря:

$$u\left[\frac{m}{s}\right]=\frac{qv\left[\frac{m^3}{s}\right]}{A[m^2]}=\frac{qv\left[\frac{m^3}{s}\right]}{\frac{\pi}{4}(d[m])^2}=\frac{6\times10^4\,qv\left[\frac{l}{min}\right]}{\frac{\pi}{4}(0{,}01[m])^2}=\frac{qv\left[\frac{l}{min}\right]}{150\times\pi} \tag{2}$$

- формула для розрахунку питомого опору повітряного потоку:

$$R_S\left[\frac{Pa\times s}{m}\right]=\frac{R\left[\frac{Pa\times s}{m^3}\right]}{u\left[\frac{m}{s}\right]}=\frac{dp}{qv\times u}=\frac{150\pi\times dp[Pa]}{qv\left[\frac{l}{min}\right]}, \tag{3}$$

де d – діаметр зразка.

Опір повітряного потоку можна визначити за формулою:

$$\sigma=\frac{R_S}{D}, \tag{4}$$

де D – товщина зразка.

Відповідно до моделі Мікі, на основі опору потоку можна визначити питомий опір z_c та номер хвилі k_c для матеріалу

$$z_c=\rho_0 c_0\left(1+0.07\left(\frac{f}{s}\right)^{-0.632}-j0.107\left(\frac{f}{s}\right)^{-0.632}\right), \tag{5}$$

$$k_c=\frac{\omega}{c_0}\left(1+0.109\left(\frac{f}{s}\right)^{-0.618}-j0.16\left(10^3\frac{f}{s}\right)^{-0.618}\right), \tag{6}$$

де $\omega=2\pi f$, f – частота; ρ_0 – щільність повітря; c_0 – швидкість звуку в повітрі; σ – опір повітряного потоку.

Поверхневий опір можна визначити за формулою:

$$z_w=-i\times z_c\times\cot(kc\times D) \tag{7}$$

де D – товщина матеріалу; $\theta=0$ – кут падіння хвилі.

Коефіцієнт відбиття R і коефіцієнт поглинання звуку α можна обчислити за допомогою формул:

$$R=\frac{\frac{z_w}{\rho_0 c_0}\cos(\theta)-1}{\frac{z_w}{\rho_0 c_0}\cos(\theta)+1}, \tag{8}$$

$$\alpha=1-\left|R^2\right|. \tag{9}$$

Програмне забезпечення для збирання даних

Для збирання даних використано вимірювальну карту National Instruments PXI-446. У середовищі LabView розроблено спеціально призначену програму для керування системою. Інтерфейс програми показано на рис. 4. Користувач може встановити такі параметри: товщину та площу зразка, затримку часу до наступного вимірювання (використовується для стабілізації потоку

повітря після його зміни), кількість ітерацій (кількість вимірювань, які підлягають усередненню) і тривалість вимірювання. Користувач може вибрати одне вимірювання щосекунди або визначити довільний час у мілісекундах. Встановивши 100 мілісекунд, за хвилину можна отримати тисячі значень, а це неможливо, коли людина відповідає за ручне збирання даних.

Коли процедура починається, вимірювання повторюється n разів, де n – вибрана кількість ітерацій. Потім з'являється діалогове вікно, і користувачеві пропонують змінити значення повітряного потоку. Після вибраного часу затримки вимірювання повторюється. Уся ця процедура повторюється, поки користувач не припинить її. Одночасно з вимірюванням відображаються діаграми тиску та потоку повітря, щоб забезпечити контроль над умовами вимірювання та уникнути порушень.

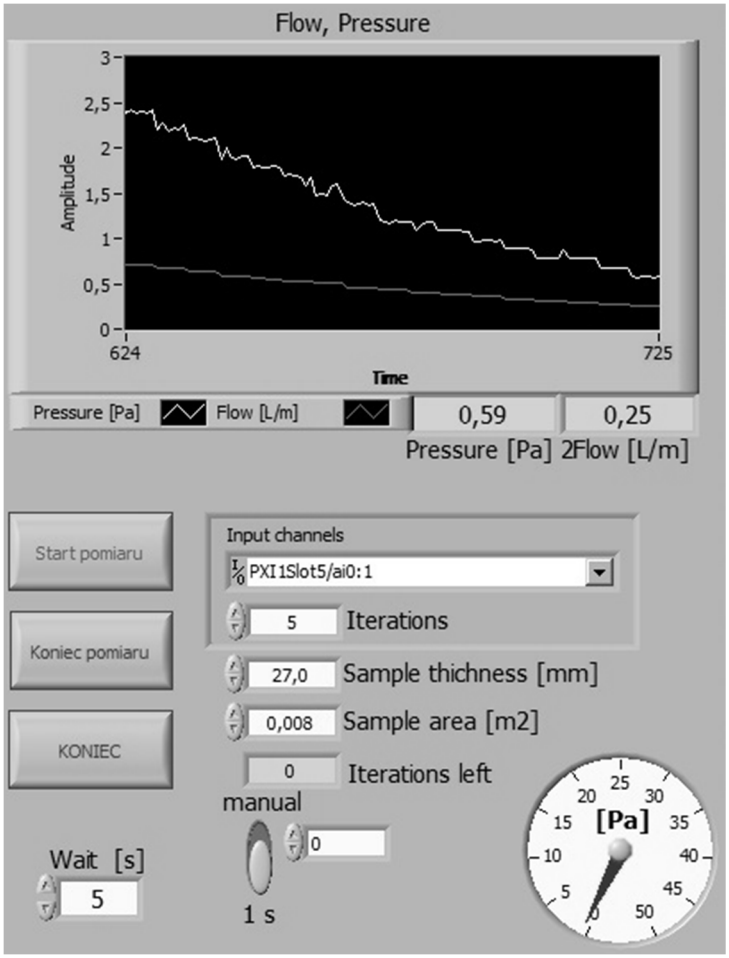


Рис. 4. Інтерфейс програмного забезпечення в LabView

Друга частина програми – аналіз даних у режимі реального часу. Як показано на рис. 5, співвідношення між перепадом тиску і потоком повітря використовують для обчислення опору потоку як функції лінійного потоку повітря. Потім результати наводять на графіку. Ця функціональність програми дає змогу в реальному часі оцінити достовірність вимірювань і вирішити, коли вимірювання потрібно завершити. Після закінчення вимірювання результати можна експортувати у вибраний формат.

Програмне забезпечення для аналізу даних

Для перевірки запроваджених модифікацій результати, отримані на модернізованому лабораторному стенді, порівнювали із результатами вимірювань в імпедансній трубці. Щоб уможливити це порівняння, значення коефіцієнта звукопоглинання, отримані під час вимірювань в імпедансній

трубці, були застосовані для обчислення опору потоку тестових матеріалів. Для оцінки відповідності між значеннями коефіцієнта звукопоглинання, виміряними в імпедансній трубці та обчисленими за моделлю Мікі, запропоновано використати коефіцієнт детермінації.

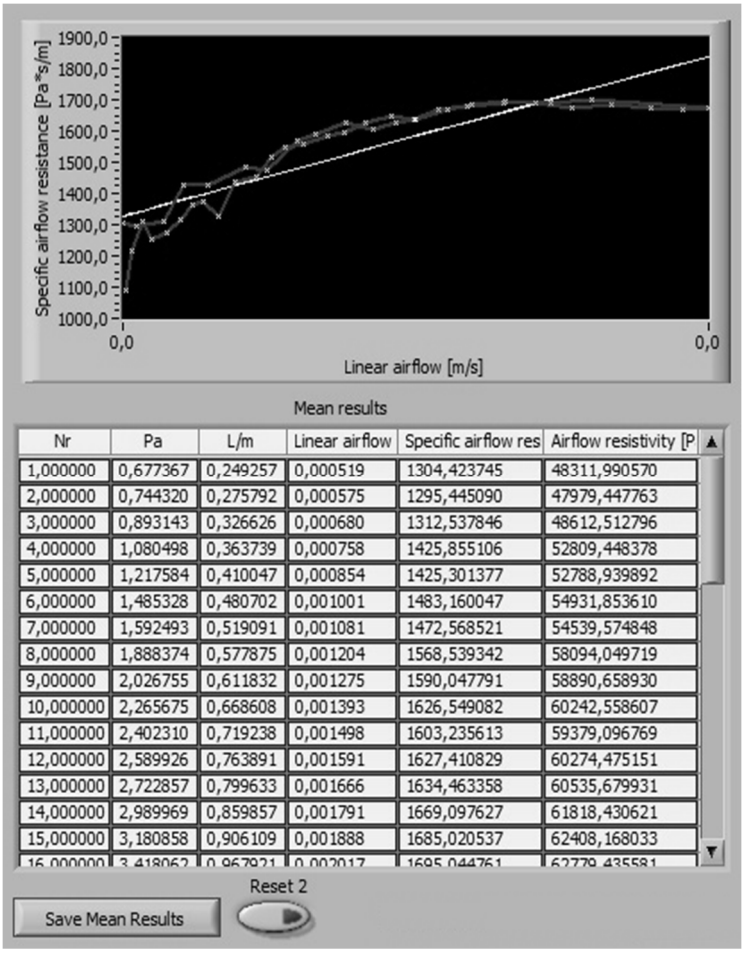


Рис. 5. Модуль результатів у LabView

Опір потоку може набувати значення від 0 до нескінченності. Перевірка всіх можливостей теоретичної моделі (у цьому випадку моделі Мікі) потребувала б великих обчислювальних потужностей. Тому запропоновано метод швидкого добору значень опору потокові повітря. Попереднього аналізу із використанням методу бісекції [12] виявилося недостатньо. Тому запропоновано подібний підхід. Набір даних розділяють не на два, а щонайменше на десять інтервалів. Запропонований алгоритм подано на рис. 6 а результат роботи на рис. 7. Зауважимо, що після невеликої кількості ітерацій можна знайти значення опору потоку, яке відповідає заданому коефіцієнту звукопоглинання. Точність пошуку дорівнює 1 $[Pa \times s / m]$. Змінюючи значення кроку k, в алгоритмі, як на рис. 6, можна збільшити або зменшити точність, але це також впливатиме на час обчислення.

Аналіз та результати

Запропонований алгоритм розрахунку опору повітряного потоку із використанням значення коефіцієнта звукопоглинання (див. рис. 6) реалізовано у середовищі MatLab.

За допомогою запропонованого методу розраховано опір повітряного потоку двох матеріалів (показаних на рис. 8): Sinterm-FR (товщина 30 мм) та меламінової піни (товщина 30 мм). Результати подано на рис. 9, а та рис. 9, б.

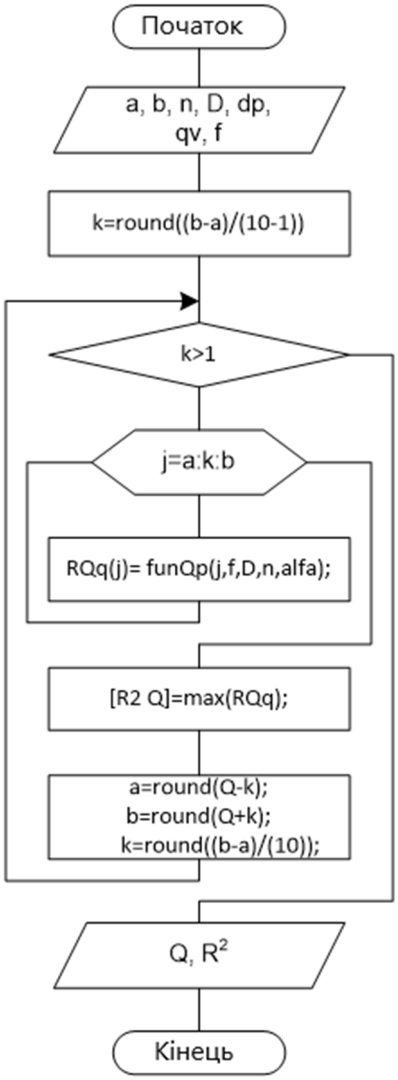


Рис. 6. Алгоритм розрахунку опору повітряного потоку із використанням коефіцієнта поглинання звуку

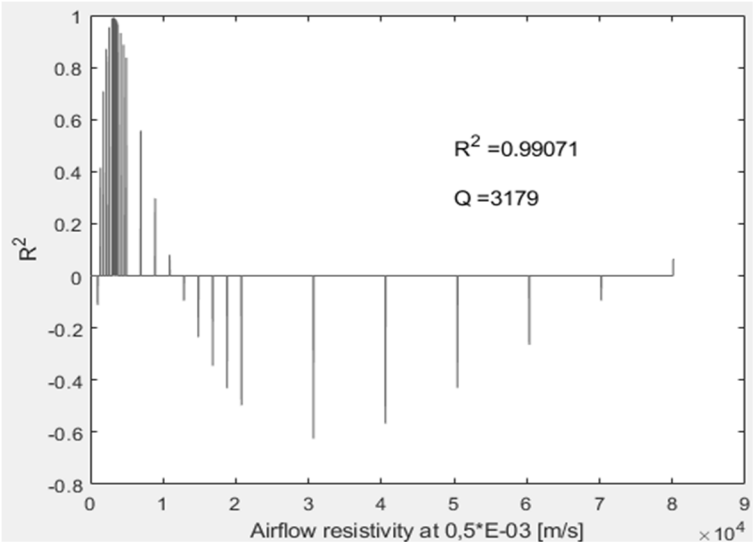


Рис. 7. Приклад виконання алгоритму

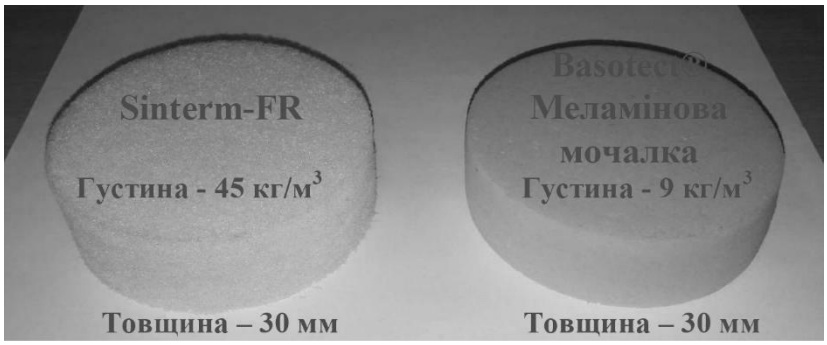
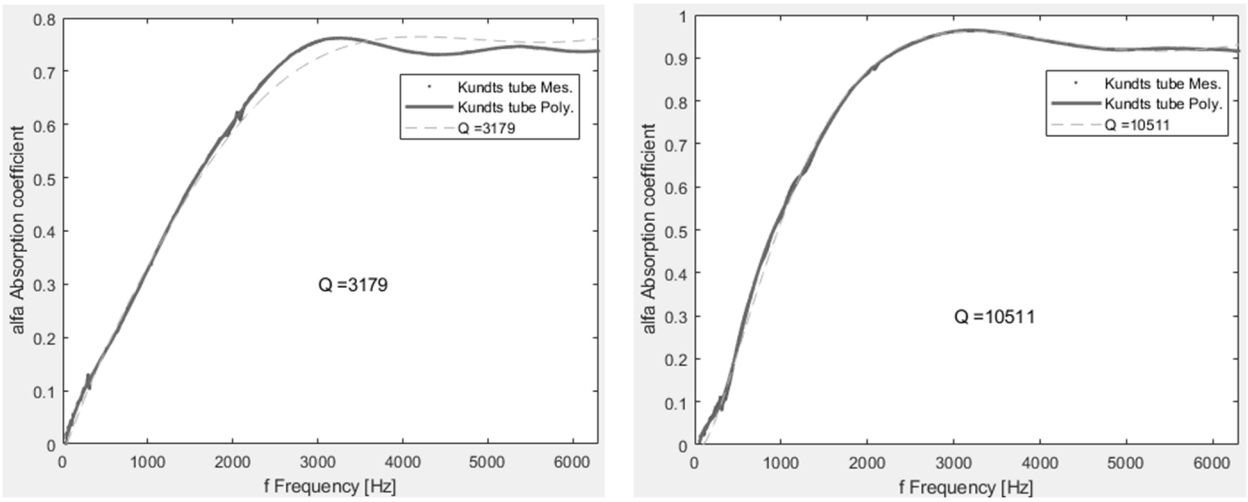


Рис. 8. Аналізовані зразки: Sinternm-FR (зліва) та меламінова мочалка (справа)

На графіках (рис. 9) показано для порівняння значення коефіцієнта звукопоглинання, отримані під час вимірювань в імпедансній трубці, та значення, обчислені за допомогою опору потоку, для найкращого співвідношення із результатами вимірювань. Наведені результати свідчать про дуже хороше узгодження, що підтверджує можливість точного визначення коефіцієнта звукопоглинання на основі відомого опору повітряному потоку. Щоб мінімізувати помилку, важливо визначити цей параметр максимально точно.



а *б*

Рис. 9. Значення коефіцієнта поглинання звуку, отримані в імпедансній трубці та обчислені за моделлю Мікі для відповідного опору потоку: а – нетканий поліестер (Sinterm-FR); б – меламінова піна

На наступному етапі розроблено програму для подальшого аналізу даних, отриманих на вимірювальному стенді. Дані (тиск, потік повітря та товщина зразка) завантажують із файлів csv, щоб полегшити аналіз результатів та розрахунки.

На рис. 10 показано співвідношення між потоком повітря q і падінням тиску Dp для 5000 зразків. Як можна помітити, це лінійна кореляція, однак у разі врахування опору потоку (рис. 11) для низьких значень повітряного потоку розбіжностей більше, а невизначеність вимірювання зростає. У зв'язку з цим запропоновано метод попередньої лінійної апроксимації (PLA), який складається із трьох кроків:

3. Визначення поліноміального відношення між потоком повітря і падінням тиску (рис. 10).

4. Визначення опору потоку за допомогою полінома, визначеного на першому кроці. Процедура розпочинається із найбільшого значення повітряного потоку і триває доти, доки розбіжності між результатами не перевищать заданий поріг.

5. Визначення полінома із набору даних, обчислених на попередньому етапі, а потім – знаходження значення опору потоку для швидкості повітряного потоку 0,5 мм/с з використанням екстраполяції.

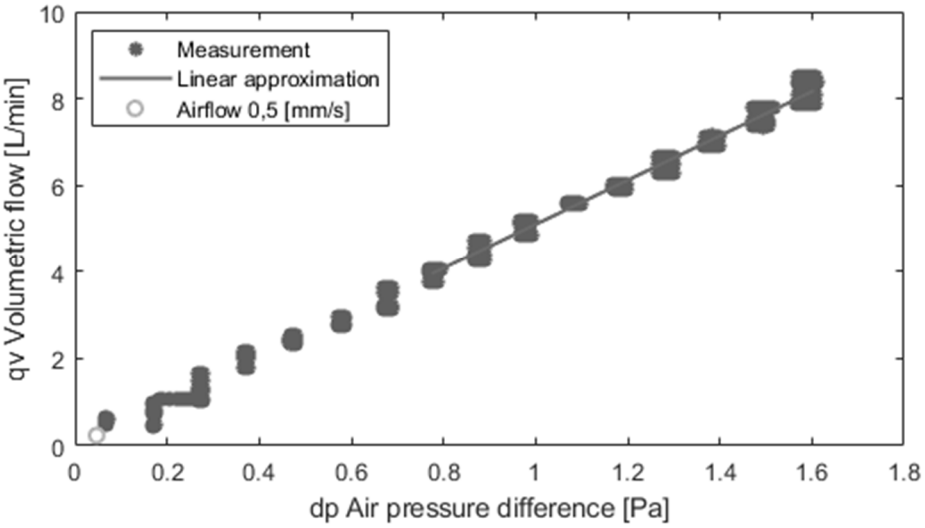


Рис. 10. Залежність між об'ємним потоком qv
і падінням тиску dp *для нетканого поліестеру*

На рис. 11 показано графік опору потоку поліефірного нетканого матеріалу (Sinterm-FR) як функцію падіння тиску dp. Ці значення отримано трьома способами: обчислено в результаті експерименту, розраховано з використанням лінійного наближення для всього набору даних і обчислено за допомогою запропонованого методу PLA.

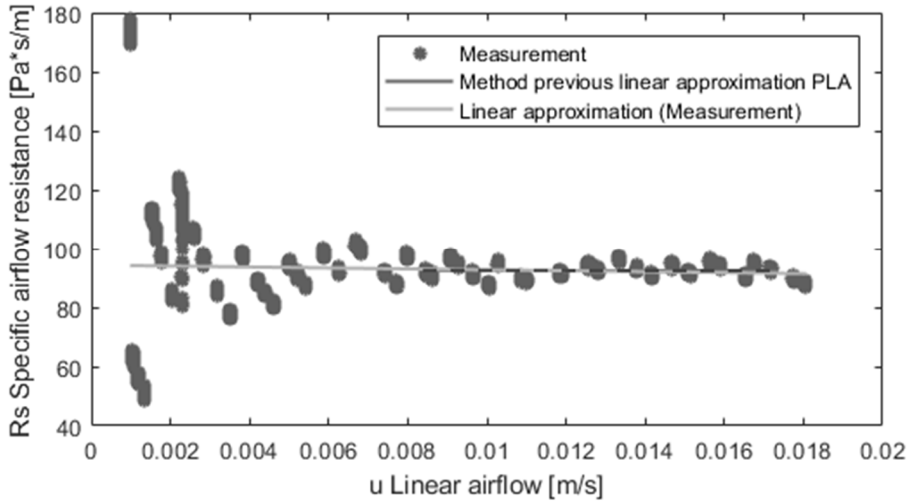


Рис. 11. Питомий опір потоку повітря для нетканого поліестеру Rs
як функція лінійного повітряного потоку

Як можна зауважити на рис. 12, запропонований спосіб екстраполяції та лінія регресії за результатами експериментів дуже схожі у всьому діапазоні. Це пояснюється тим, що розбіжності значень опору повітря симетричні щодо лінії регресії за низьких значень потоку повітря. Однак помилки у цьому діапазоні здебільшого випадкові, а для іншого набору даних шаблон не буде симетричним. У результаті запропонований спосіб буде ще точнішим.

Для перевірки результатів використано значення опору потоку для обчислення коефіцієнта звукопоглинання з використанням моделі Мікі. Ці значення потім порівнювали із величинами, отриманими вимірюванням в імпедансній трубці.

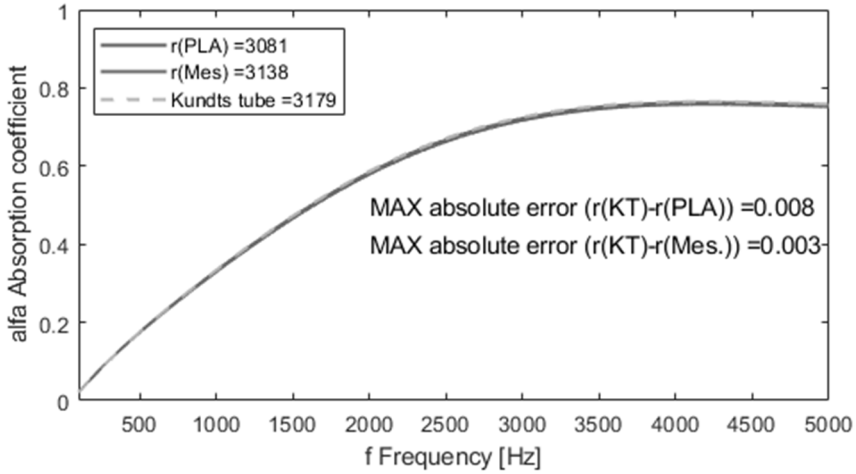


Рис. 12. Порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для нетканого поліестеру, отриманого вимірюванням в імпедансній трубці, визначеного лінійним наближенням для всього набору даних і розрахованого за допомогою запропонованого методу PLA

Можна зауважити, що максимальна абсолютна похибка запропонованого способу дорівнює 0,008, а це означає, що точність вимірювання на модифікованому стенді задовільна щодо вимірювань в імпедансній трубці.

На рис. 13 показано залежність між потоком повітря q і падінням тиску Δp для меламінової піни.

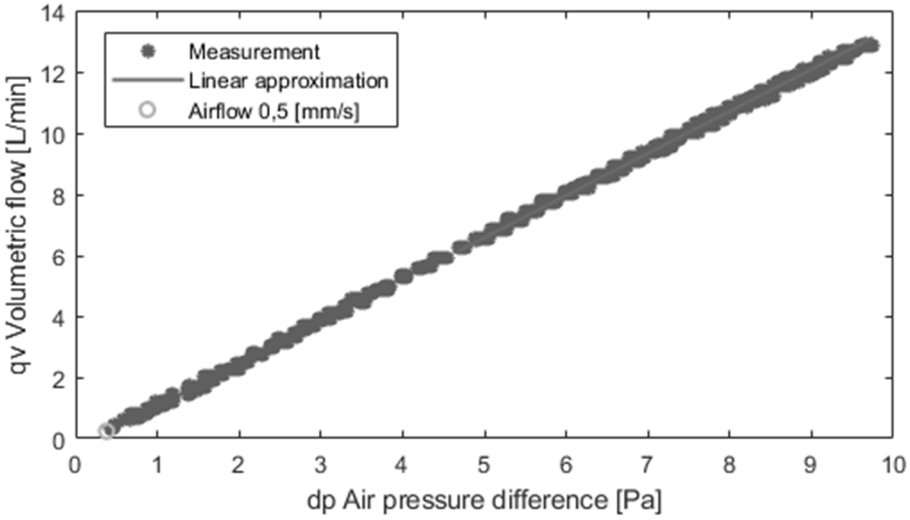


Рис. 13. Залежність між об'ємним потоком q_V і падінням тиску dp для меламінової піни

Питомий опір повітряного потоку меламінової піни як функцію лінійного повітряного потоку показано на рис. 14. Значення Rs обчислено трьома способами: в результаті експерименту, із використанням лінійного наближення для всього набору даних й за допомогою запропонованого методу PLA.

Стосовно меламінової піни пропонований спосіб дає змогу краще зіставити регресійну пряму з експериментальними даними, а це мінімізує похибку вимірювання порівняно із раніше використовуваним методом.

Порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для меламінової піни, отриманих за допомогою вимірювання та розрахунків (рис. 15), показує, що метод PLA дає можливість точніше визначити коефіцієнт поглинання звуку порівняно із класичним методом.

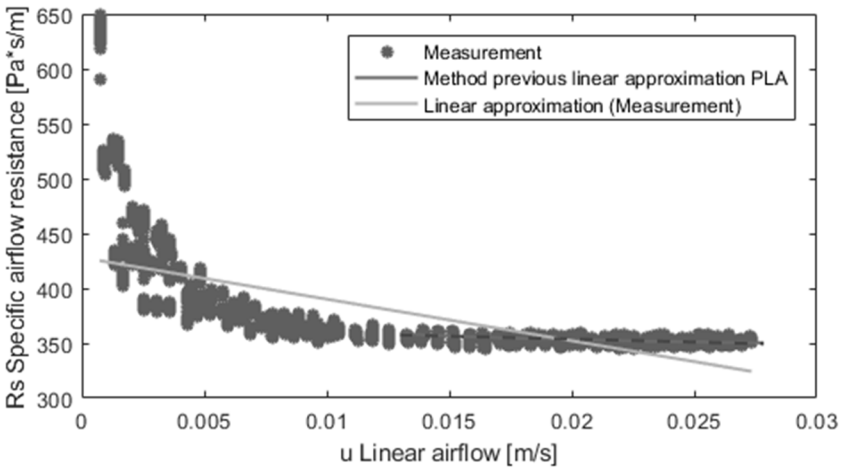


Рис. 14. Питомий опір повітряного потоку піни меламіну **Rs** *як функція лінійного повітряного потоку. Значення* **Rs** *обчислено за допомогою: експерименту, лінійного наближення для всього набору даних та запропонованого методу* **PLA**

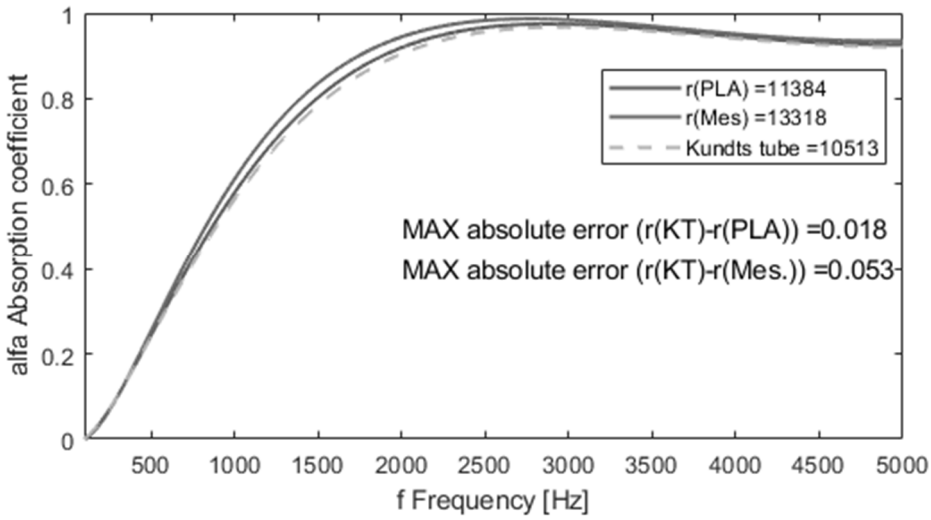


Рис. 15. Порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для меламінової піни, отриманих вимірюваннями в імпедансній трубці, визначених із використанням лінійного наближення для всього набору даних і розрахованих за допомогою запропонованого методу **PLA**

У таблиці підсумовано значення опору потокові повітря; стовпець “PLA” містить результати, отримані з використанням запропонованого методу, стовпець “Mes.” – усереднені результати експерименту та стовпець “Імпендансна тр.” – опір потокові, обчислений із використанням значень коефіцієнтів звукопоглинання, отриманих вимірюванням в імпедансній трубці.

Значення опору потоку повітря, отримані різними методами

Матеріал	D,	Густина,	PLA	Експеримент	Імпедансна тр.
	мм	кг/м^3	R_s[Па×с/ м]		
Sinterm-FR	30	45	3081	3138	3178
Меламінова губка	30	9	11384	13318	10513

Висновки

Модифікований лабораторний стенд для вимірювання опору потоку пористих матеріалів за допомогою використання давачів MEMS дав змогу підвищити точність вимірювань за рахунок збільшення кількості вимірюваних даних та їх усереднення. Щоб підвищити точність вимірювання, під час проведення експерименту після кожної ітерації графічно подається співвідношення між опором потоку та потоком повітря. Це дає змогу в режимі реального часу спостерігати за вимірюванням і допомагає вирішити, коли вимірювання потрібно перервати через надмірний повітряний потік.

Проведено вимірювання, спрямовані на перевірку лабораторного стенда; значення, отримані на стенді для двох різних матеріалів, порівнювали зі значеннями, одержаними в результаті вимірювань коефіцієнта звукопоглинання в імпедансній трубці.

Запропоновано спосіб визначення опору повітряного потоку пористих матеріалів. Цей метод підвищує точність та повторюваність вимірювань порівняно із раніше використовуваним підходом.

Запропоновано метод швидкого визначення опору повітряного потоку із використанням значень коефіцієнта звукопоглинання. Це дало авторам змогу порівнювати результати, отримані на стенді, з результатами, одержаними в імпедансній трубці, зіставляючи значення тільки опору повітряного потоку, а не коефіцієнта звукопоглинання як функції частоти.

References

1. NSTU EN ISO 10534-1:2019 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1.

2. NSTU EN ISO 10534-2:2019 Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2.

3. NSTU ISO 354:2007 Acoustics. Measurement of sound absorption in the reverberation chamber.

4. Rubacha, J., Pilch, A., & Zastawnik, M. (2012). Measurements of the Sound Absorption Coefficient of Auditorium Seats for Various Geometries of the Samples. *Archives of Acoustics,* 37(4), 483–488.

5. Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied acoustics*, 3(2), 105–116.

6. Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E),* 11(1), 19–24.

7. Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials-generalizations of empirical models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E),* 11(1), 25–28.

8. Allard, J., & Atalla, N. (2009). Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e. John Wiley & Sons.

9. Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Crc Press.

10. Kamisiński, T., Brawata, K., Pilch, A., Rubacha, J., & Zastawnik, M. (2012). Sound diffusers with fabric covering. *Archives of Acoustics*, 37(3), 317–322.

11. NSTU EN 29053:2019 Acoustics. Materials for acoustic applications. Determination of air flow resistance.

12. Melnyk, M. R., Kernytskyy, A. B., Lobur, M. V., Zajac, P., Szermer, M., Maj, C., ... & Napieralski, A. (2015, February). Applying the golden section search in optimization of micro actuator design. *In The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics* (pp. 53–56). IEEE.

METHOD FOR DETERMINING AIRFLOW RESISTANCE OF POROUS MATERIALS BASED ON SOUND ABSORPTION COEFFICIENT

Mykhaylo Melnyk[1], Andriy Kernyskyy[1], Jaroslaw Rubacha[2], Tadeusz Kamisinski[2]

[1] Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine
MelnykMR@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8593-8799,
andriy.b.kernytskyy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-8188-559X
[2] AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland,
jrubacha@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7624-8879,
kamisins@agh.edu.pl, ORCID: 0000-0002-8580-2402

© Melnyk Mykhaylo, Kernyskyy Andriy, Rubacha Jaroslaw, Kamisinski Tadeusz, 2019

The article presents software developed in the Labview system to automate the process of calculating the flow resistance of porous materials. The approach is to automatically collect and process information from a pressure sensors and a flow meter. The developed software made it possible to automate the process of determining the sound absorption coefficients of porous materials by the method of blowing airflow. The software allows performing real-time data analysis. The relationship between the change in pressure and the airflow are represented with a graph. This, in turn, makes it possible to evaluate the accuracy of measurements in real time. Measurement procedure and measurement methods are described. A method of rapid determination of airflow resistance based on sound absorption coefficients was developed and implemented. This allowed comparing the results obtained from an impedance tube and a laboratory stand for determining airflow resistance by the air-blowing method, comparing only the value of air resistance but not the function of the dependence of the absorption coefficient on the frequency. For the calculation of the sound absorption coefficient, an empirical Miki model was selected, which is a modification of the Delaney-Bazley model, but, unlike the latter, excludes the appearance of negative values of the sound absorption coefficient at low frequencies. To test the methods, the values of the airflow resistance were determined in three ways: calculated as a result of the experiment, calculated using a linear approximation for the entire data set, and calculated using the proposed method. The example of melamine foam shows that the proposed method is better able to map the regression line with the experimental data which minimizes the measurement error compared to the previously used method.

Key words: impedance tube, sound absorption coefficients, specific airflow resistance, sound absorbing materials, airflow resistance.