

УДК: 629.017:629.018

OECD: 629.017:629.018

Моделирование свойств низкочастотных акустических метаматериалов

Рахматов Р.И.^{1*}, Говердовский В.Н.², Карпов Е.В.³¹К.т.н., с.н.с., ²Д.т.н., в.н.с., ³Д.ф.-м.н., г.н.с.^{1,2,3}Московский политехнический университет, г. Москва, РФ

Аннотация

В статье представлен подход к решению одной из критических проблем акустики: низкочастотных звуковых колебаний, оказывающих вредное и опасное влияние на качество жизни и жизнедеятельность человека. Подход включает алгоритм численного решения задач моделирования и оптимизации структуры и геометрии элементов акустического метаматериала (АММ). Валидность подхода подтверждена данными стендовых испытаний образцов в акустическом волноводе. Результаты показывают, что разработанные АММ способны стать высокоэффективным средством для широкополосной звукоизоляции. В частности, образцы АММ толщиной 8–10 мм обеспечивают беспрецедентно высокую эффективность, $TL > 30$ дБ, звукоизоляции, начиная с полосы частот 250–320 Гц, достигая значений $TL = 40$ –44 дБ в более высоких полосах частот, 500–1600 Гц. Подход может быть применен для проектирования и практического использования новых АММ в системах звукоизоляции на транспорте, в строительстве, других отраслях.

Ключевые слова: низкочастотный воздушный шум, звукоизоляция, акустический метаматериал, численное моделирование, параметрическая оптимизация, экспериментальное исследование

Modeling the properties of the low frequency acoustic metamaterials

Rakhmatov R.I.^{1}, Goverdovskiy V.N.², Karpov E.V.³**¹Ph.D., Senior researcher, ²D.Sc., Leading researcher, ³D.Sc., Principal researcher**^{1,2,3}Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

Abstract

This paper presents an approach to solving a critical problem in acoustics: suppression the low-frequency sound harmfully and dangerously affecting the human life and activity. The approach includes an algorithm for numerically solving the problems of designing, setup and optimizing the elements' structure and geometry of an acoustic metamaterial (AMM). The validity of the approach is confirmed though the testing the samples in the acoustic duct. The results show, the AMM designed can be a highly effective for the broadband sound insulation. In particular, the AMM of 8 to 10 mm thickness samples provide unprecedentedly high efficiency, $TL > 30$ dB, starting from the frequency band 250 to 320 Hz, and rising the values to $TL = 40$ –44 dB in the higher frequency bands, 500 to 1600 Hz. This approach can be applied for designing and practical use the new AMMs for sound insulating in transportation, construction, and other industries.

Keywords: low-frequency airborne noise, sound insulation, acoustic metamaterial, computer simulation, parametric optimization, experimental study

*E-mail: rakhmatov.rakhmatdzhon@gmail.com (Рахматов Р.И.)

Введение

Акустические метаматериалы (АММ) – искусственно создаваемые композитные конструкции, свойства которых определяются не столько элементным составом, сколько возможностями настройки внутри- и межслойных структурных связей и геометрии элементов для эффективного управления акустическими волнами или их ослабления в заданном диапазоне частот. АММ являются одним из ключевых объектов современных и перспективных научных исследований [1–3]. Известные разработки АММ показывают многообещающие результаты в решении практических задач ослабления звуковых колебаний и шума на средних и высоких частотах [4–11]. Однако известные решения недостаточно эффективны в диапазоне низких и средних частот. Недавние исследования показали, что АММ могут обеспечивать некоторую эффективность по критерию «потери мощности звука» (transmission loss, TL) в отдельных полосах низких частот [2, 12, 13]. В данной работе предложен подход к проектированию АММ, который способен обеспечить качественную широкополосную звукоизоляцию в исследуемом диапазоне. В рамках подхода, разработан и реализован численный алгоритм моделирования тонкослойных композитных элементов с настройкой структуры и геометрии путем варьирования размеров, массовой плотности и объемного модуля упругости элементов. Валидность подхода подтверждается результатами испытаний тест-образцов АММ из элементов на основе высокомолекулярных полимеров с полидисперсными наполнителями из неорганических и биорганических материалов. Испытания проведены в сертифицированном акустическом волноводе по методу четырех микрофонов.

1 Разработка структуры и геометрии модели АММ

1.1 Параметризация и структурирование элементов модели

Конечно-элементное (КЭ) моделирование выполнено путем формирования и варьирования параметров тонких слоев структурных (композитных) элементов АММ. В качестве исходной базы для моделирования использованы экспериментальные данные о пространственном распределении и размерах пор, массовой плотности и объемном модуле упругости тест-образцов, основа (матрица) которых изготовлена из литевых полиуретанов с наполнителями в виде полидисперсной фазы из неорганических, органических или комбинированных материалов [14].

Далее выполнена послойная геометрическая параметризация исходной КЭ-модели, пример которой показан на рисунке 1.

Для минимизации толщины z слоя структурного элемента и, соответственно, массы АММ, количество слоев КЭ-модели было ограничено пятью.

На рисунке 2 представлена исходная КЭ-модель композитного элемента для исследования и анализа эффективности звукоизоляции с помощью проектируемого АММ по критерию потери мощности звука (transmission loss, TL) и последующей настройки структуры и геометрии. Граничные условия для моделирования: канальные акустические моды на входе в КЭ-модель АММ задавались с амплитудой 1 Па; на выходе – «абсолютно согласуемый слой» (полное затухание).

1.2 Расчеты акустических характеристик и параметрическая оптимизация АММ

Выполнено моделирование акустических характеристик (звукоизоляция по TL-критерию) с помощью исходной КЭ-модели, представленной на рисунке 2. Результаты (пример) тестовых расчетов представлены на рисунке 3.

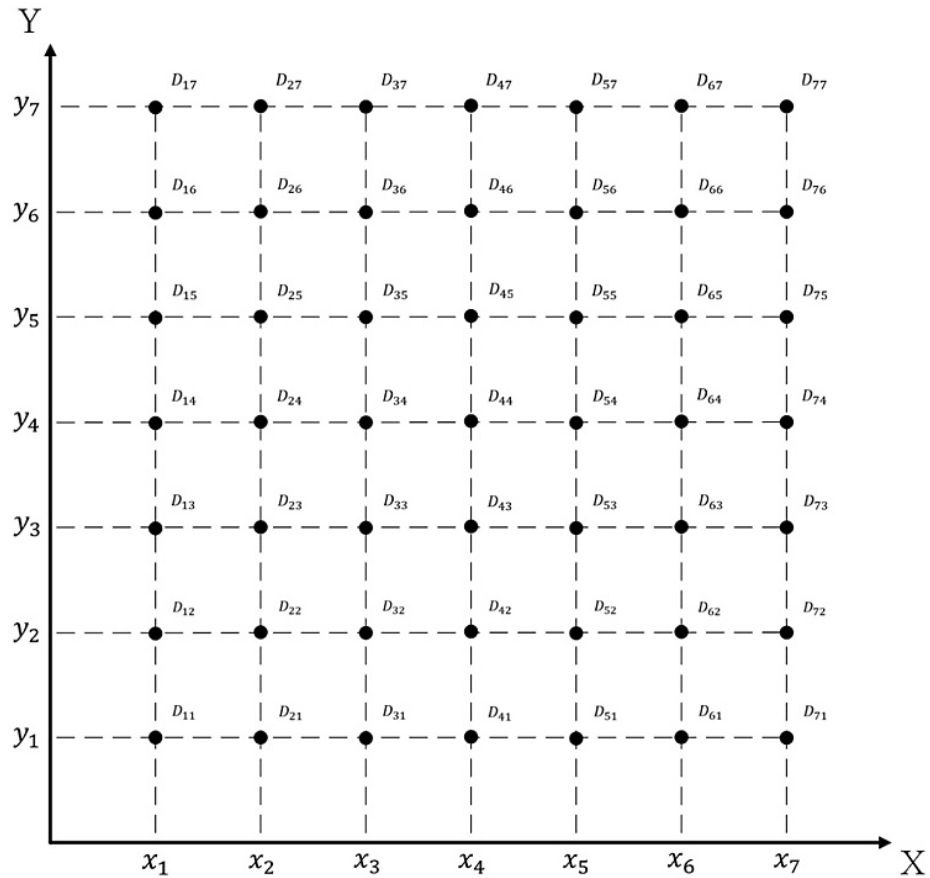
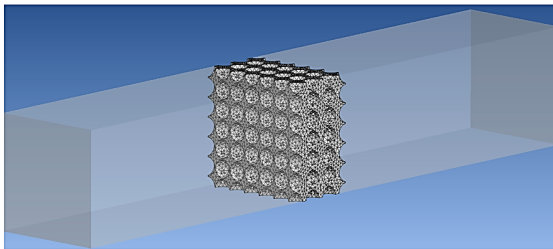
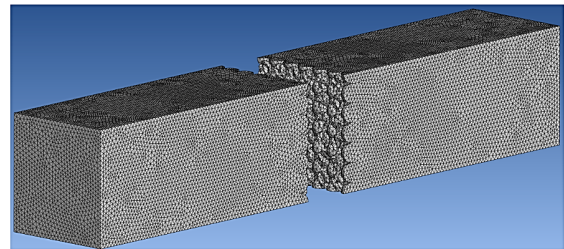


Рисунок 1 – Параметризация исходного слоя КЭ-модели АММ. Здесь D – диаметры пор в слое (мм), $x_n - x_{n-1} = l_x$, $y_n - y_{n-1} = l_y$, и $z_n - z_{n-1} = l_z$, x , y и z – расстояния между порами в направлениях (мм)

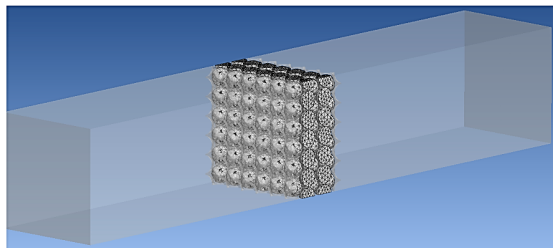
Положение структуры АММ



Входной и выходной акустические каналы



Положение пор АММ



Граничные условия

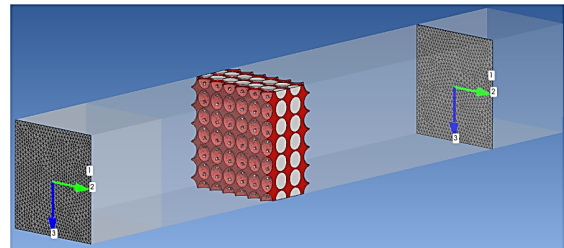


Рисунок 2 – Общая КЭ-модель для численного исследования АММ

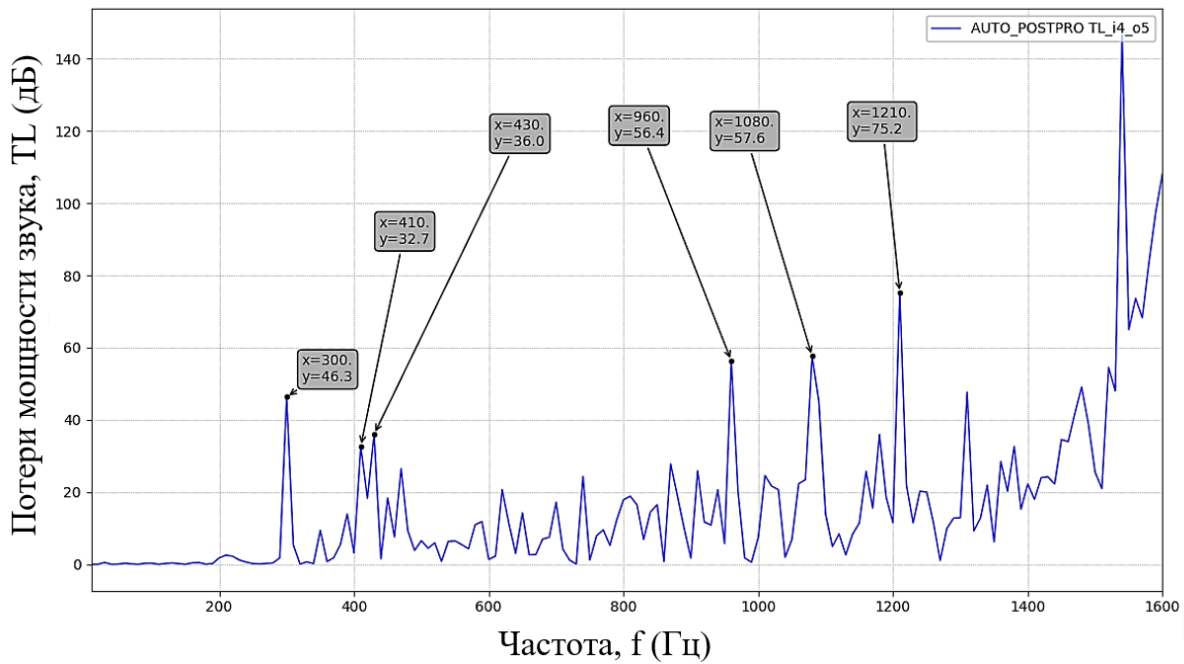


Рисунок 3 – Эффективность низкочастотного подавления звуковых колебаний по TL-критерию, Тестирование исходной КЭ-модели АММ (пример)

В процессе расчетов определялись корреляционные зависимости параметров КЭ-модели и прогнозные значения характеристик эффективности АММ. Примеры корреляционной матрицы на частоте 63 Гц показаны на рисунке 4.

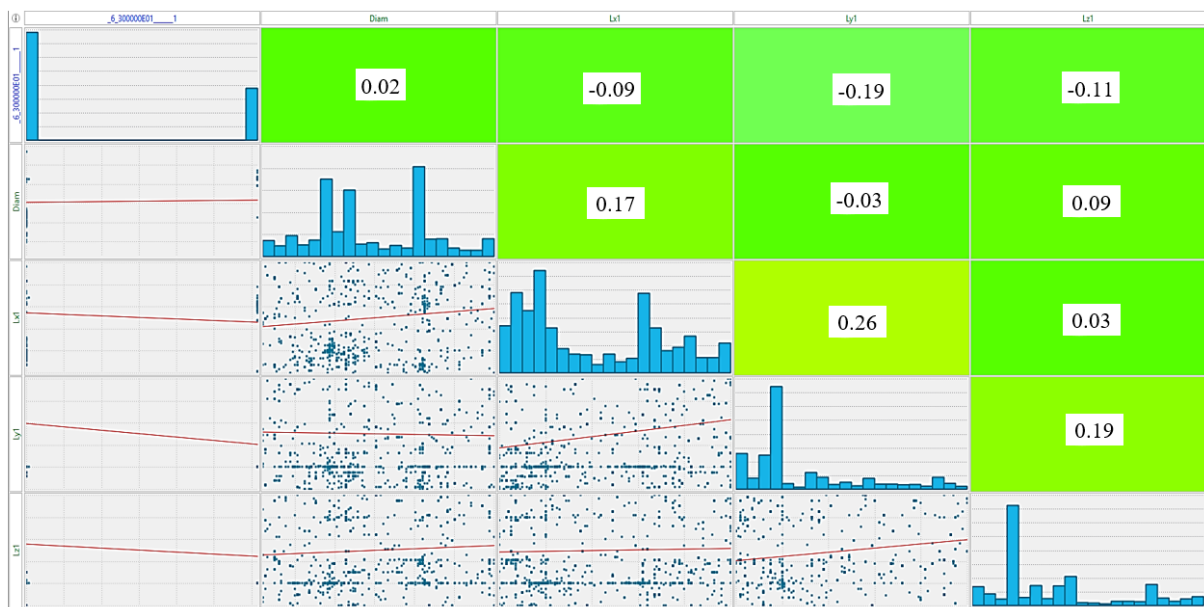


Рисунок 4 – Корреляция геометрических параметров и акустических характеристик АММ

Из анализа результатов (см. рисунки 3 и 4) следует, в частности, почти линейная зависимость TL-значений от размеров ячеек пористой структуры композитных элементов АММ, причем практически во всем исследуемом диапазоне частот. При этом коэффициент корреляции геометрических параметров КЭ-модели АММ и механических

характеристик (массовая плотность и объемный модуль упругости) элементов АММ составляет ~ 0.02 . Двукратное и более изменение геометрических параметров приводит к расслаиванию структуры, при этом TL-значения увеличиваются.

На основе ИИ-платформы SHERPA [15], используя параметрический оптимизатор Siemens' HEEDs [16], разработаны алгоритм и итерационная процедура проведения численного эксперимента по оптимизации структуры и геометрии КЭ-модели АММ. В качестве исходных переменных приняты параметры слоев (см. рисунок 1). Целевая функция оптимизационной задачи – получение требуемых TL-значений для дискретного ряда частот исследуемого диапазона. На рисунке 5 показаны стоп-кадры процедуры, с помощью которой получены 2500 вариантов структуры КЭ-модели АММ.

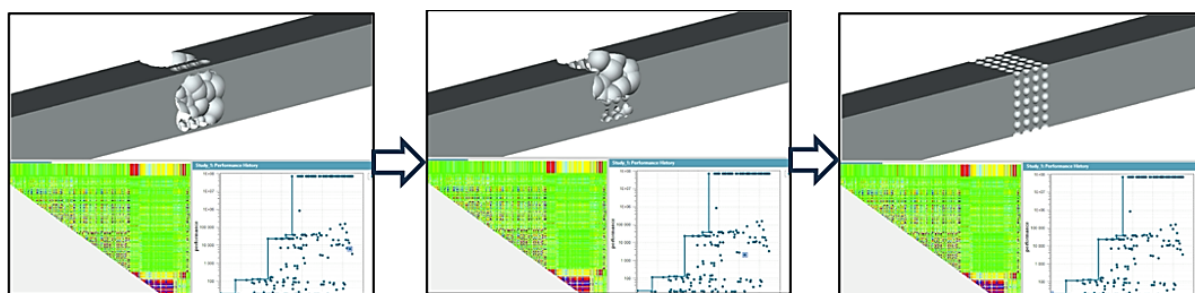


Рисунок 5 – Итерационная процедура оптимизации структуры и геометрии слоев КЭ-модели АММ (пример)

Помимо алгоритма SHERPA, использовались другие алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) с точным анализом в рамках гибридно-адаптивной поисковой системы, для активного обучения модели и ускорения поиска оптимальной структуры АММ, что позволило сократить время поиска на 32%. Кроме того, примененная ИИ-платформа позволяет повторно использовать предыдущие данные, предоставляя ценную информацию для проектирования новых вариантов модели АММ с требуемыми характеристиками, что в конечном итоге экономит время и средства. По результатам решения оптимизационной задачи найдено более 270 вариантов структуры и геометрии модели АММ, способных качественно изменить звукоизоляцию в исследуемом диапазоне частот (см. один из вариантов структуры на рисунке 6).

Выполнено численное моделирование распределения звуковых давлений по сечению оптимизированных композитных элементов АММ в исследуемом диапазоне частот. На рисунке 7 представлены результаты моделирования (примеры) для частот критических низких и средних полос диапазона.

Анализ результатов показывает, что разработанная КЭ-модель АММ способна качественно изменить поле возбуждения звуковых колебаний (см. входной сигнал). Это особенно важно для более низких частот: АММ эффективно блокирует прохождение звуковой энергии (см. пример на рисунке 7а). Как результат, звуковое поле на выходе КЭ-модели имеет принципиально иную структуру, при этом интенсивность колебаний существенно ниже значений на входе. В целом, параметры композитных элементов КЭ-модели АММ настраивались на широкополосную звукоизоляцию в исследуемом диапазоне. Следует отметить также, что в композитных элементах с оптимальными структурой и геометрией наблюдается повышенное звуковое давление (см. примеры на рисунках 7а–7б). Внутри них интенсивно снижается энергия падающей волны, элементы переизлучают её, создавая сложное звуковое поле на выходе. Таким образом, разрабатываемые АММ способны качественно выполнять свою функцию – кратно уменьшать энергию звуковых колебаний на критических низких и средних частотах.

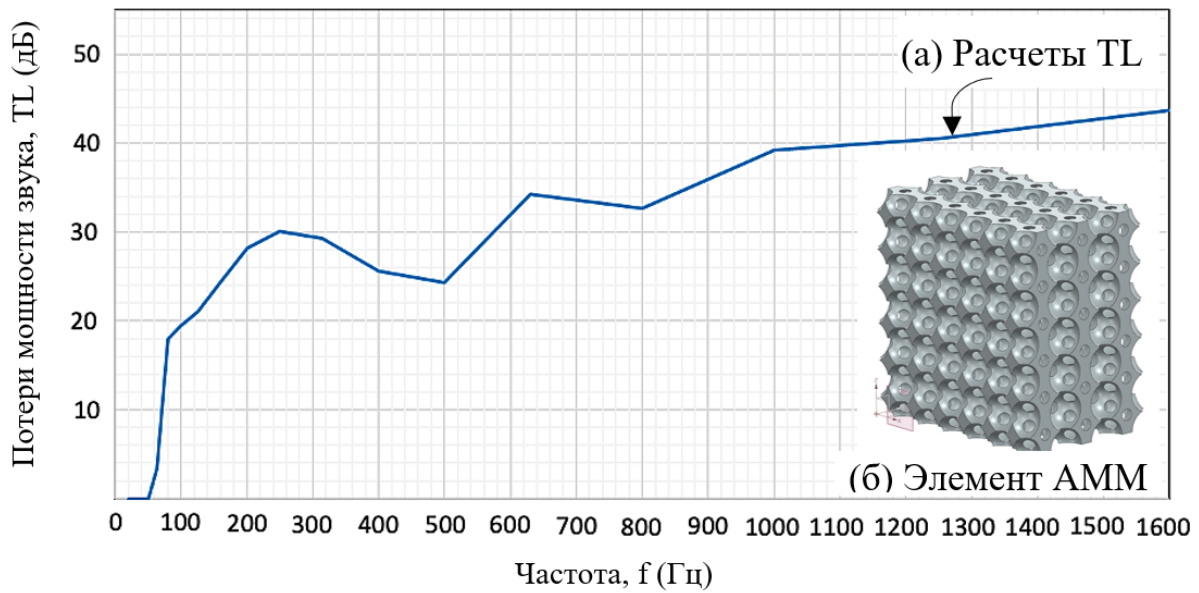


Рисунок 6 – Результаты оптимизации структуры и геометрии КЭ-модели АММ (пример): (а) расчеты функции $TL(f)$, (б) композитный элемент АММ

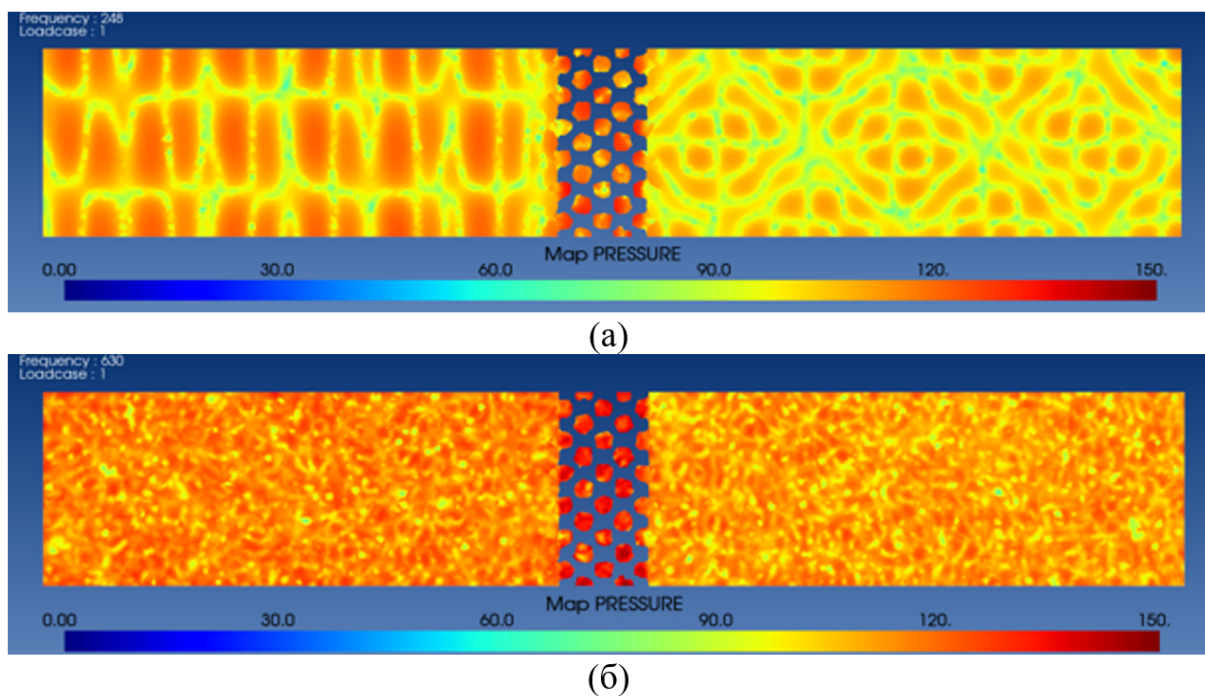


Рисунок 7 – Распределение значений звукового давления по сечению композитного элемента АММ на критических частотах: (а) 248 Гц, (б) 630 Гц

2 Валидация расчетных характеристик КЭ-модели АММ

Для оценки адекватности акустических характеристик, рассчитанных с помощью моделей композитных элементов АММ, выполнены экспериментальные исследования тест-образцов элементов в акустическом волноводе.

2.1 Стендовое моделирование звуковых сигналов

Исследованы уровни потерь мощности звуковых колебаний тест-образцов композитных элементов АММ. Тесты-образцы: композиты, основу которых составляют литьевые полиуретаны (ЛПУ), в которые введены модифицирующие наполнители – полидисперсные частицы неорганических и/или биорганических порошковых материалов с заданными удельными характеристиками. Эффективная толщина каждого из примененных в стендовом эксперименте тест-образцов составляла 8–10 мм [14].

На рисунке 8 показан алгоритм измерения звукового давления на входе-выходе модели системы звукоизоляции и статистического анализа эффективности системы по ТЛ-критерию в исследуемом диапазоне низких и средних частот $f = 20\text{--}1600$ Гц.

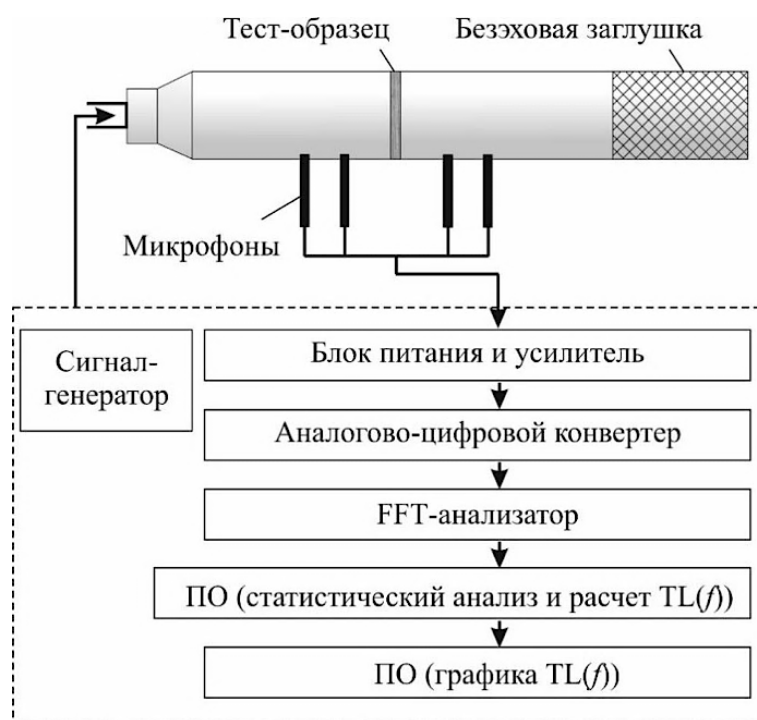


Рисунок 8 – Блок-схема измерения и анализа потерь мощности звука

Алгоритм реализован на сертифицированном автоматизированном комплексе испытательного оборудования. Комплекс состоит из 100-мм акустического волновода, четырех широкополосных микрофонов и портативного прибора, включающего источник питания, генератор случайного шума, усилитель и преобразователь аналоговых сигналов в цифровые, анализатор спектра методом быстрого преобразования Фурье (FFT-анализатор) в диапазоне частот $f = 20\text{--}1600$ Гц. Программное обеспечение комплекса позволяет автоматически, в онлайн режиме, выполнять статистическую обработку измеренных сигналов, расчеты ТЛ-значений, анализ и графическое представление данных измерений и расчетов [17].

2.2 Сравнение результатов численного и физического экспериментов

Экспериментальные исследования выполнены с применением серии тест-образцов композитных элементов АММ. Характеристики пористости, массовой плотности и объемного модуля упругости композиционных материалов, из которых изготовлены тест-образцы элементов, были использованы при численном моделировании. На рисунке 9 представлен сравнительный пример эффективности системы звукоизоляции с помощью КЭ-модели композитного элемента и структурно и геометрически подобного тест-образца

элемента, изготовленного из специального полимера на основе ЛПУ с наполнителем из микросфер золы уноса [14].

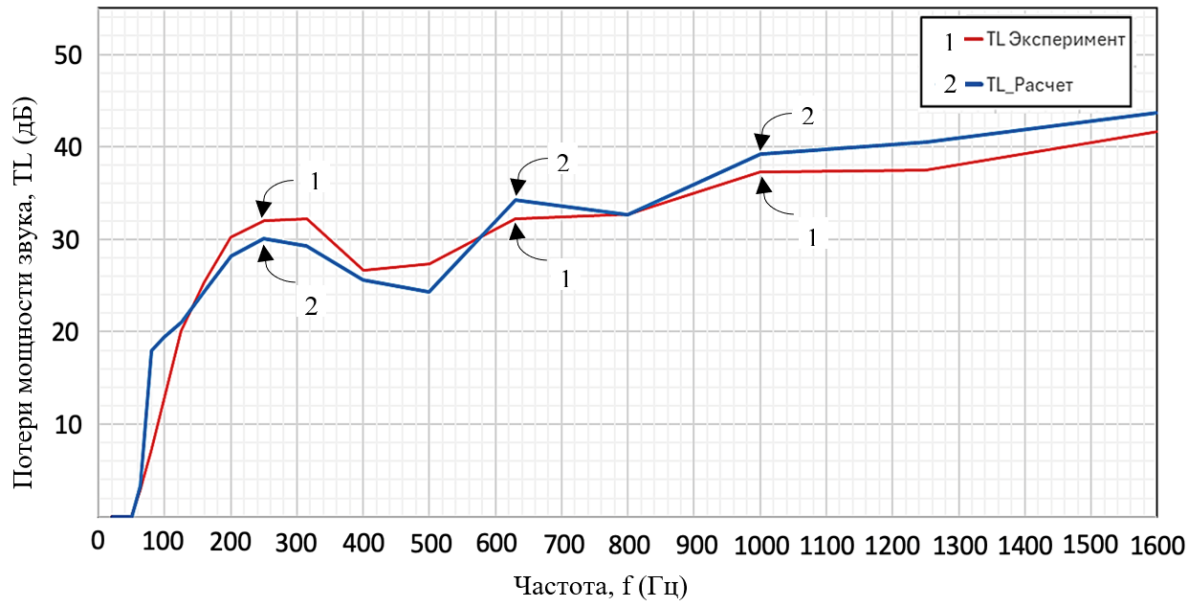


Рисунок 9 – Результаты (пример) экспериментальной валидации КЭ-модели АММ

Из рисунка 9 следует, что, начиная с 50 Гц, имеет место резкий рост качества звукоизоляции, достигающий локального максимума $TL \approx 32$ дБ в полосе частот 250–320 Гц. Далее, в полосе частот менее 500 Гц эффективность звукоизоляции несколько снижается, до $TL \approx 24$ –26 дБ. Начиная с 500 Гц, качество звукоизоляции непрерывно возрастает, достигая значений $TL \approx 34$ –39 дБ и $TL \approx 40$ –44 дБ в полосах частот 600–1000 Гц и 1200–1600 Гц, соответственно. Сравнительный анализ численных и физических значений акустических характеристик показывает, что представленная КЭ-модель АММ может быть использована для дальнейшей разработки реальных АММ, способных качественно изменить широкополосную звукоизоляцию.

Заключение

В статье представлены результаты применения нового подхода к решению одной из критических проблем акустики – снижение уровней воздействия воздушного шума, оказывающего вредное и опасное влияние на здоровье, качество жизни и эффективность жизнедеятельности человека. В рамках подхода разработана численная модель акустического метаматериала (АММ), продемонстрированы работоспособность модели, её возможности для настройки и оптимизации структуры и геометрии АММ. Валидность подхода подтверждена результатами испытаний тест-образцов композитных элементов, структурно и геометрически подобных модели, в сертифицированном акустическом волноводе. Результаты показывают, что АММ способны стать высокоэффективным средством снижения широкополосного шума на низких и средних частотах. В частности, тест-образцы толщиной 8–10 мм обеспечивают беспрецедентно высокую эффективность звукоизоляции, $TL > 30$ дБ, в полосе частот 200–320 Гц, достигая значений $TL = 40$ –44 дБ на более высоких частотах, 500–1600 Гц. Высокая степень корреляции данных численных и физических экспериментов делает подход надёжным инструментом для проектирования и практического использования новых АММ, особенно с применением аддитивных технологий и технологий искусственного интеллекта.

Благодарности

Авторы благодарят профессора Ч.-М. Ли за полезные консультации и техническую помощь в организации и проведении экспериментального исследования тест-образцов в акустическом волноводе.

Источник финансирования

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ), научный проект № 23–19–00258.

Список использованных источников

1. Zhang J., Hu B., Wang S. Review and perspective on acoustic metamaterials: from fundamentals to applications // *Applied Physics Letters*. 2023. N 123, 010502. doi.org/10.1063/5.0152099.
2. Chang B., Wang S., Liang G. [et al.]. Broadband low-frequency diffuse sound transmission loss of multilayer composite plate-type metamaterials // *Composites Part C* 17. 2025, 100620. doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100620.
3. Peri V., Song Z.-D., Serra-Garcia M. [et al.]. Experimental characterization of fragile topology in an acoustic metamaterial // *Science*. 2020. N 367. P. 797-800. doi:10.1126/science.aaz7654.
4. Nakayama M., Matsuoka T., Saito Y. [et al.]. A practically designed acoustic metamaterial sheet with two-dimensional connection of local resonators for sound insulation applications // *Journal of Applied Physics*. 2021. N 129, 105106. doi:10.1063/5.0041738.
5. Li L., Diao Y., Wu H., Jiang W. Complementary acoustic metamaterial for penetrating aberration layers // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. N. 25. P. 28604–28614. doi.org/10.1021/acsami.2c06227.
6. Deng H., Xu X., Zhang C. [et al.]. Deterministic self-morphing of soft-stiff hybridized polymeric films for acoustic metamaterials // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. N 12. P. 13378-13385. doi:10.1021/acsami.0c01115.
7. Xu J., Cai H., Wu Z. [et al.]. Acoustic metamaterials-driven transdermal drug delivery for rapid and on-demand management of acute disease // *Nature Communications*. 2023. N 14. P. 1-9. doi.org/10.1038/s41467-023-36581-2.
8. Kumar S., Lee H.-P. Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances // *Crystals*. 2020. N 10, 686. doi.org/10.3390/cryst10080686.
9. Gao N., Zhang Z., Deng J. [et al.]. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Advanced Materials & Technologies*. 2022. N 7, 2100698. doi.org/10.1002/admt.202100698.
10. Huang J., Xu Y., Qi S. [et al.]. Ultrahigh energy-dissipation elastomers by precisely tailoring the relaxation of confined polymer fluids // *Nature Communications*. 2021. N 12. P. 1-10. doi:10.1038/s41467-021-23984-2.
11. Hua X., Thomas A., Shultis K. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness // *Science Progress*. 2021. N 104, 00368504211005224. doi:10.1177/00368504211005224.
12. *Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency*. Edited by V. Romero-García and A.-C. Hladky-Hennion. John Wiley & Sons, 2019.
13. Lu K., Wu J.-H., Guan D. [et al.]. A lightweight low-frequency sound insulation membrane-type acoustic metamaterial // *AIP Advances*. 2016. N 6, 025116. doi.org/10.1063/1.4942513.

14. Говердовский В.Н., Карпов Е.В., Михайленко М.А., Горбунов Ф.К. Способ изготовления звукоизолирующего материала //Патент РФ на изобретение. Заявка № 2025113112 от 15.05.2025.
15. Siemens Software. – Available: plm.sw.siemens.com. (дата обращения 08.2025).
16. Siemens Digital Industries Software (DISW) Products. Available: feacomp.com. (дата обращения 08.2025).
17. Scien Co., Ltd. “Acoustic Software and Development”: Methods and products. – Available: www.scien.co.kr. (дата обращения 08.2025).

References

1. Zhang J., Hu B., Wang S. Review and perspective on acoustic metamaterials: from fundamentals to applications //Applied Physic Letters. 2023. N 123, 010502.
2. Chang B., Wang S., Liang G. [et al.]. Broadband low-frequency diffuse sound transmission loss of multilayer composite plate-type metamaterials //Composites Part C 17. 2025, 100620. doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100620.
3. Peri V., Song Z.-D., Serra-Garcia M. [et al.]. Experimental characterization of fragile topology in an acoustic metamaterial //Science. 2020. N 367. P. 797-800. doi:10.1126/science.aaz7654.
4. Nakayama M., Matsuoka T., Saito Y. [et al.]. A practically designed acoustic metamaterial sheet with two-dimensional connection of local resonators for sound insulation applications //Journal of Applied Physics 2021. N 129, 105106. doi: 10.1063/5.0041738.
5. Li L., Diao Y., Wu H., Jiang W. Complementary acoustic metamaterial for penetrating aberration layers //ACS Applied Materials & Interfaces. 2022. N. 14, 25 P. 28604–28614. doi.org/10.1021/acsami.2c06227.
6. Deng H., Xu X., Zhang C. [et al.]. Deterministic self-morphing of soft-stiff hybridized polymeric films for acoustic metamaterials //ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. N 12. P. 13378-13385. doi:10.1021/acsami.0c01115.
7. Xu J., Cai H., Wu Z. [et al.]. Acoustic metamaterials-driven transdermal drug delivery for rapid and on-demand management of acute disease //Nature Communications. 2023. N 14. P. 1-9. doi.org/10.1038/s41467-023-36581-2.
8. Kumar S., Lee H.-P. Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances //Crystals. 2020. N 10, 686. doi.org/10.3390/cryst10080686.
9. Gao N., Zhang Z., Deng J. [et al.]. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. Advanced Materials & Technologies. 2022. N 7, 2100698. doi.org/10.1002/admt.202100698.
10. Huang J., Xu Y., Qi S. [et al.]. Ultrahigh energy-dissipation elastomers by precisely tailoring the relaxation of confined polymer fluids //Nature Communications. 2021. N 12. P. 1-10. doi:10.1038/s41467-021-23984-2.
11. Hua X., Thomas A., Shultis K. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness //Science Progress. 2021. N 104, 00368504211005224. doi:10.1177/00368504211005224.
12. Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency. Edited by V. Romero-García and A.-C. Hladky-Hennion. John Wiley & Sons, 2019.
13. Lu K., Wu J.-H., Guan D. [et al.]. A lightweight low-frequency sound insulation membrane-type acoustic metamaterial //AIP Advances. 2016. N 6, 025116. doi.org/10.1063/1.4942513.

-
14. Goverdovskiy V.N., Karpov E.V., Mikhailenko M.A., Gorbunov F.K. A method for manufacturing the sound insulating material //RU Patent for invention. A2025113112 dated 15.05.2025.
 15. Siemens Software. – Available: plm.sw.siemens.com. (дата обращения 08.2025).
 16. Siemens Digital Industries Software (DISW) Products. Available: feacomp.com. (дата обращения 08.2025).
 17. Scien Co., Ltd. “Acoustic Software and Development”: Methods and products. – Available: www.scien.co.kr. (дата обращения 08.2025).