

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90

Фанина Е.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: evgenia-@mail.ru

ЭФФЕКТИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА

Аннотация. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по определению акустических характеристик объемных панелей фиксированной толщины из композиционного материала на основе углерода, установленных в проеме между реверберационными камерами. Определены индексы звукоизоляции при их возбуждении диффузным звуковым полем в широких диапазонах частот.

Рассчитано время реверберации в модельных камерах с различной конфигурацией перегородок. Определена оптимальная конфигурация перегородки с пирамидальными ячейками для снижения времени реверберации в помещениях.

Использование графита в виде тонких плёнок, наносимых на различные поверхности, позволяет существенно снизить уровни звукового давления в помещении и повысить индексы звукоизоляции воздушного шума. Помимо тонких плёнок, графит можно использовать в качестве добавки в композиционных материалах звукоизоляционного назначения. Показано, что характеристики таких панелей имеют достаточно универсальный характер. Проведено сравнение измеренных акустических характеристик панелей из композиционного материала с аналогичными характеристиками традиционных материалов. Определили, что композиция относится к I группе огнезащитной эффективности и может быть рекомендована для использования в качестве огнезащитного материала.

Разработанный акустический материал является эффективным поглощающим средством, который решает задачи в архитектурной акустике, подавления эха в строительстве и архитектуре. Схожие с метаматериалами, природные и искусственные графиты позволяют решать эти задачи при небольших объемах и массах с применением простых не дорогостоящих технологий.

Ключевые слова: звукопоглощение, индекс звукоизоляции, композиционная панель, углеграфитовый материал.

Введение. В конце 20-го века, в результате увеличения акустической нагрузки на техносферу и окружающую среду, значительно увеличился рост номенклатуры звукопоглощающих материалов и конструкций в различных областях науки и техники [1, 2]. Появились новые разделы акустики, например, автомобильная, авиационная акустика с определенными функциональными свойствами [3, 4]. Так, для автомобильных приоритетных характеристик являются небольшой удельный вес, негорючесть, низкая гигроскопичность, высокая способность материала к демпфированию.

Борьба с шумом на промышленных предприятиях и промплощадках является одной из насущных проблем в настоящее время, а создание эффективных акустических материалов и конструкций – одним из самых востребованных направлений современной промышленности. Многочисленными исследованиями доказано, что шум снижает производительность труда на промышленных предприятиях на 30 %, повышает опасность травматизма, приводит к развитию заболеваний. В структуре профессиональных заболеваний в РФ примерно 17 % приходится на заболевания органа слуха [5].

В дизайне архитектурных сред при создании комфортной среды применяют всевозможные

акустические панели и экраны. Важными их характеристиками являются долговечность, эксплуатационные свойства, возможность быстрого и удобного монтажа, а также внешний вид. Помимо шумозащитных свойств экраны служат преградой от распространения вредных химических веществ и частиц тяжелых металлов.

В 90-х годах началось исследование свойств новых акустических материалов – метаматериалов (АММ). Это искусственные материалы с ячейками малых волновых размеров. Их структура компактная, с множеством мелких деталей, искусственно созданной периодической структурой [6–16]. Акустические метаматериалы позволяют решать задачу синтеза оптимального поглотителя при минимальных массах и объемах, что значительно повышает звукопоглощающие характеристики конструкционных материалов.

На этапах проектирования акустических конструкций применяют элементы моделирования с использованием различного программного обеспечения [17, 18]. Большую роль в решении этой задачи сыграли работы В. Сэбина, С. Эйринга, В. Кнудсенса и др. [19, 20], в которых были созданы начала статистической теории акустики помещений, учитывающей поглощение стен и геометрические параметры, что привело к разработке новых поглощающих материалов и

звукопоглощающих конструкций с заданными параметрами.

Цель данной работы заключается в разработке эффективных акустических композиционных материалов с низкими массовыми и объемными удельными характеристиками.

Материалы и методы. В качестве звукопоглощающего материала использовали графит марки ГЛС-1, таблица 1. Гранулометрический состав графита (рис. 1) свидетельствует, что наиболее вероятный радиус частиц графита находится в интервале 36–130 мкм.

В качестве связующего для получения звукопоглощающего слоя рассматривалось жидкое

стекло – метасиликат натрия по ТУ 6-15-433-92 с модулем 3,36; массовой долей Na_2O – 7,04 % и SiO_2 – 22,96 %; плотностью 1,29 г/см³.

Таблица 1

Физико-химические показатели графита

Наименование показателя	ГЛС-1
Зольность, %, не более	13
Серы	–
Меди	1,0
Удельная поверхность, м ² /г	1,2

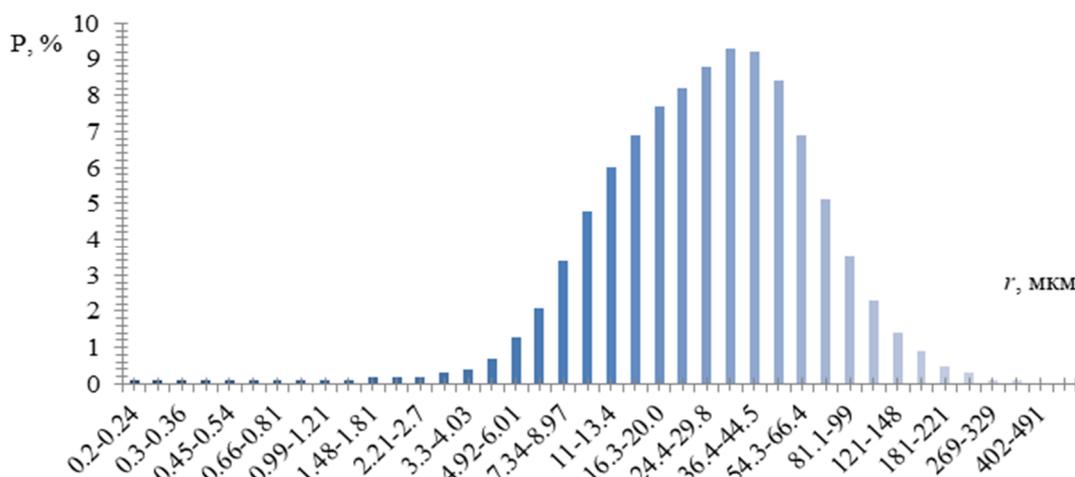


Рис. 1. Гранулометрический состав графита марки ГЛС-1

Для определения акустических характеристик определяли индекс звукоизоляции графитовой перегородки с помощью модельной камеры для определения звукоизолирующих характеристик.

Для измерения индекса звукоизоляции, а также уровня звукового давления сконструирована модельная камера для прохождения звуковых волн через различные виды перегородок.

В лабораторных условиях степень проникновения воздушного шума через исследуемую перегородку измеряют в смежных помещениях. В одном помещении устанавливают источник шума, в другом – микрофон. Перегородкой между помещениями служит исследуемая конструкция.

В модельной камере используется мощный широкополосный источник звука, конструктивно изолированный от стенок камеры и расположенный таким образом, чтобы звуковые волны направлялись непосредственно перпендикулярно к испытываемому образцу. Кроме того, камера разделена на две составные части во избежание прохождения звука по ее стенкам, искажая значение индекса звукоизоляции перегородки. Эти

особенности позволяют повысить чувствительность прибора и снизить погрешность при измерениях звукового давления.

В качестве источника звуковых волн используется цифровой генератор, соединенный с широкополосным динамиком. Приемником является система из предусилителя микрофонного ВПМ-101, капсуля микрофонного конденсаторного М-101 и измерителя шума и вибрации ВШВ-003-М 3, рис. 2.

Согласно СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» нормируемым параметром звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций жилых и общественных зданий, а также вспомогательных зданий производственных предприятий является индекс изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями R_w , дБ.

Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ ограждающей конструкции с известной частотной характеристикой изоляции воздушного шума определяется путем сопоставления этой частотной характеристики с оценочной кривой, приведенной в табл. 2.

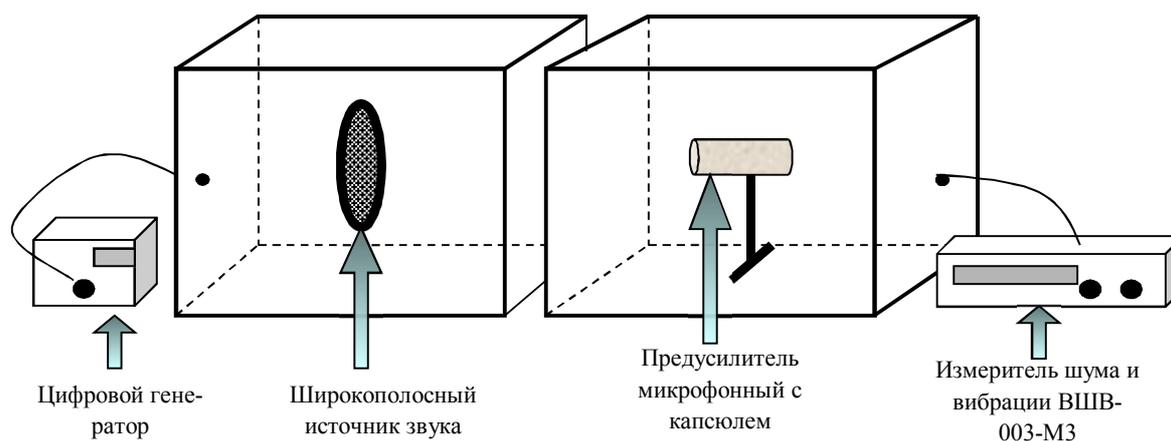


Рис. 2. Модельная камера для определения индекса звукоизоляции

Таблица 2

Показатели индекса звукоизоляции на средних частотах третьоктавных полос, Гц

Показатель	Средние частоты третьоктавных полос, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R_w , дБ	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56

Для определения индекса изоляции воздушного шума R_w необходимо определить сумму неблагоприятных отклонений данной частотной характеристики от оценочной кривой. Неблагоприятными считаются отклонения вниз от оценочной кривой. Если сумма неблагоприятных отклонений максимально приближается к 32 дБ, но не превышает эту величину, величина индекса R_w составляет 52 дБ.

Если сумма неблагоприятных отклонений превышает 32 дБ, оценочная кривая смещается вниз на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала указанную величину. Если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, оценочная кривая смещается вверх (на целое число децибел) так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой максимально приближалась к 32 дБ, но не превышала эту величину.

За величину индекса R_w принимается ордината смещенной (вверх или вниз) оценочной кривой в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц.

Моделирование акустической характеристики – времени реверберации осуществлялось в программной среде Ecotect Analysis. Если звуковые коэффициенты поглощения материалов в качестве модели были правильно определены, то время реверберации в диапазоне частот для любой зоны может быть определена программно.

Основная часть. В ходе ряда научных опытов установлено, что для обеспечения достаточной звукоизоляции жилых и производственных

помещений можно использовать композиционные материалы на основе графита [21]. Использование графита в виде тонких плёнок, наносимых на различные поверхности, позволяет существенно снизить уровни звукового давления в помещении и повысить индексы звукоизоляции воздушного шума. Помимо тонких плёнок, графит можно использовать в качестве добавки в композиционных материалах звукоизоляционного назначения.

Значительного повышения индекса звукоизоляции воздушного шума добились в многослойных акустических конструкциях на основе тонкого целлюлозного волокна с графитовым покрытием и перегородках поэлементной сборки с использованием стекло-магнетитовых листов и звукоизоляционного слоя, состоящего из многослойного целлюлозного волокна с графитовым покрытием и стекловаты. Поглощение звуковых волн связано со строением кристаллической решетки графита, которая схожа со строением метаматериалов.

С помощью программного комплекса Autodesk Ecotect Analysis были проведены исследования наилучшей пригодной формы наносимого слоя материала, для изучения его акустических характеристик. Программным комплексом Autodesk был произведен расчет времени реверберации в модельных камерах с различной геометрией звукопоглощающих перегородок. За основу в расчетах использовали помещение объемом 60 м^2 $5 \times 5 \times 2,4 \text{ м}$ (рис. 3).

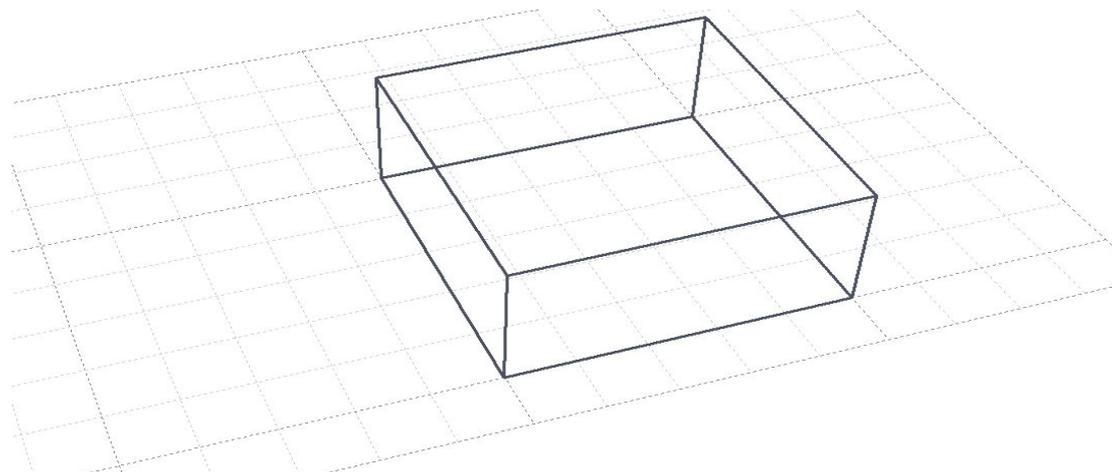


Рис. 3. Модель помещения без перегородки

Для данной модели помещения рассчитано время реверберации по методикам, разработанными В. Сэбином и С. Эйрингом, таблица 3.

Таблица 3

Время реверберации в помещении без перегородки в различных частотных диапазонах

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,68	0,67
125Гц	0,81	0,83
250Гц	1,25	1,18
500Гц	1,38	1,45
1кГц	0,46	0,47
2 кГц	0,33	0,33
4 кГц	0,25	0,26
8 кГц	0,11	0,11
16 кГц	0,12	0,12

В следующей модели, при тех же характеристиках и объеме помещения, была изменена геометрия одной плоскости в виде прямой перегородки (рис. 4) и рассчитано время реверберации, таблица 4. Объем перегородки составил 9 м³.

метрия одной плоскости в виде прямой перегородки (рис. 4) и рассчитано время реверберации, таблица 4. Объем перегородки составил 9 м³.

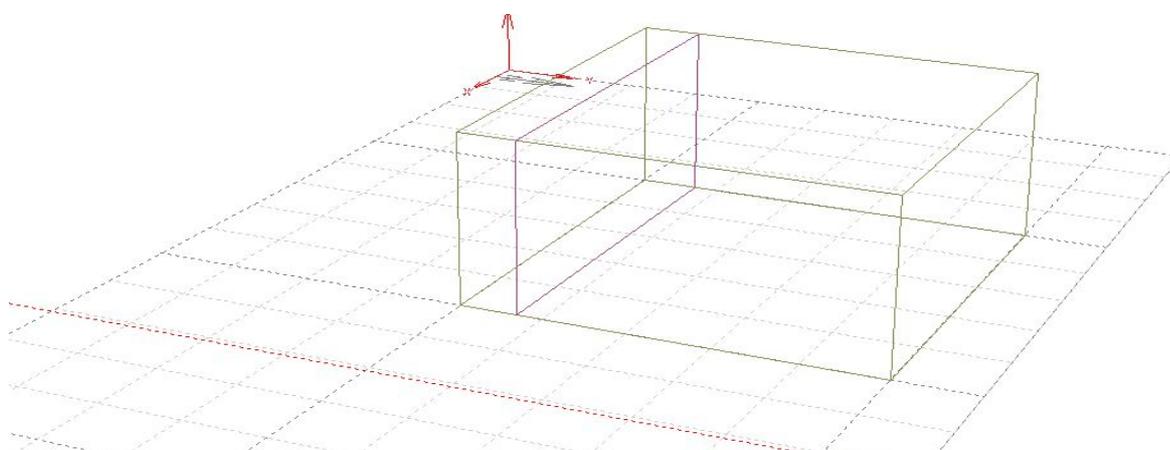


Рис. 4. Модель помещения с прямой перегородкой

При установке перегородки время реверберации снижается.

Далее, в качестве модели, рассчитывали время реверберации для перегородки с треугольными ячейками при фиксированном объеме помещения и перегородки (рис. 5).

Таблица 4

Время реверберации в помещении с прямой перегородкой в различных частотных диапазонах

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,51	0,5
125Гц	0,63	0,65
250Гц	1,07	1
500Гц	1,23	1,15
1кГц	0,26	0,26
2 кГц	0,18	0,18
4 кГц	0,13	0,14
8 кГц	0,1	0,1
16 кГц	0,09	0,09

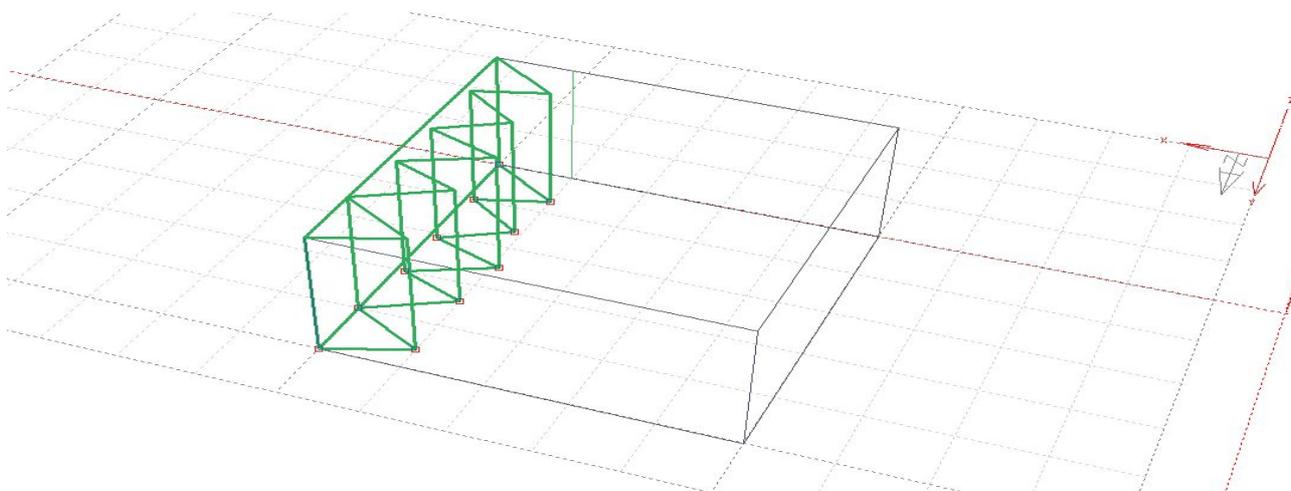


Рис. 5. Модель помещения с перегородкой с треугольными ячейками

Изменение геометрии перегородки приводит к уменьшению времени реверберации, что

положительно сказывается на акустических характеристиках в жилых и производственных помещениях (табл. 5).

Таблица 5

Время реверберации в помещении с перегородкой с треугольными ячейками в различных частотных диапазонах

Частота	Время реверберации (В. Сэбин)	Время реверберации (С. Эйринг)
63Гц	0,44	0,47
125Гц	0,56	0,58
250Гц	1	0,93
500Гц	1,23	1,12
1кГц	0,2	0,2
2 кГц	0,15	0,15
4 кГц	0,09	0,1
8 кГц	0,08	0,08
16 кГц	0,07	0,07

Для изготовления композитного материала звукоизолирующей панели использовался графит ГЛС-1, поливинилацетат, метасиликат

натрия и вода в соотношении 2:1,5:1:1 соответственно. При этом композиция должна обладать следующими свойствами:

- быстрая схватываемость материала;

- пригодность для изготовления штамповочным методом;
- термостойкость.

Индекс звукоизоляции R_w полученных панелей определяли в сконструированной модельной камере по стандартной методике. Для плоской панели R_w составил 30 дБ, для панели с пирамидальными ячейками – 36 дБ при толщине конструкций 35 мм, рисунок 6. Для сравнения, конструкция из двух листов гипсокартона по 12 мм с заполнением минеральной ватой 50 мм имеет индекс звукоизоляции 36 дБ.



Рис. 6. Внешний вид акустической графитовой панели

Испытания звукоизоляционных панелей на огнезащитную эффективность проводили в соответствии с ГОСТ Р 53292-2009. «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний.» Определили, что композиция относится к I группе огнезащитной эффективности и может быть рекомендована для использования в качестве огнезащитного материала.

Выводы

1. Рассчитано время реверберации в модельных камерах с различной конфигурацией перегородок. Определена оптимальная конфигурация перегородки с пирамидальными ячейками для снижения времени реверберации в помещениях.

2. Показано, что благодаря высокому коэффициенту внутренних потерь за счет слоистого строения кристаллической решетки графита, с акустической точки зрения композиционные материалы эффективны по сравнению с традиционными панелями.

3. Предложенный композиционный материал является эффективным поглощающим средством, который решает задачи в архитектурной акустике, подавления эха в строительстве и архитектуре. Схожие с метаматериалами, природные и искусственные графиты позволяют решать эти задачи при небольших объемах и массах с применением простых не дорогостоящих технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цвиккер К., Костен К. Звукопоглощающие материалы. М.: ИЛ, 1952. 160 с.
2. Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers (theory, design, and applications). London: Spon Press, 2006. 405 p.
3. Handbook of noise and vibration control / Ed. Crocker M.J. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1570 p.
4. Авиационная акустика / Под ред. Мунина А.Г. и Квитки В.Е. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
5. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Томаровщенко О.Н. Основы безопасности жизнедеятельности: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 224 с.
6. Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T.M., Morozov K.D., Bakhtin B.N. Potential of sound absorbers based on acoustic metamaterials // Proc. 23rd Intern. Congr. Sound and Vibr. (Athens, Greece, 2016). URL: https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_825_20160530175723879.pdf. (дата обращения: 11.12.2020)
7. Tomilina T.M., Bobrovnikskii Yu.I., Bakhtin B.N. Impedance design of efficient metamaterial sound absorbers // Proc. 24th Intern. Congr. Sound and Vibr. (London, UK, 2017). URL: https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1228_20170602183158834.pdf. (дата обращения: 03.02.2021)
8. Jimenez N., Huang W., Romero-Garcia V., Pagneux V., Groby J.-P. Ultrathin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption // App. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. № 121902. URL: http://perso.univ-lemans.fr/~jprogroby/Publication/ArticleAPL_2016.pdf. (дата обращения: 03.04.2021)
9. Jimenez N., Romero-Garcia V., Cebrecos A., Pico R., Sanchez-Morcillo V.J., Garcia-Raffi L.M. Broadband quasi perfect absorption using chirped multi-layer porous materials // AIP Advances. 2016. Vol. 6. № 121605. URL: https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered_chirped_porous.pdf. (дата обращения: 03.04.2021)
10. Ng J., Chen H., Chan C.T. Metamaterial frequency-selective superabsorber // Optics Letts. 2009. Vol. 34. № 5. Pp. 644–646.
11. Popa B.I., Zigoneanu L., Cummer S.A. Tunable active acoustic metamaterials // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. № 024303. URL: http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158_Popa13_ActiveAcousticMM.pdf. (дата обращения: 03.04.2021)

12. Popa B.I., Shinde D., Konneker A., Cummer S.A. Active acoustic metamaterials reconfigurable in real time // *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 91. № 220303. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.00453.pdf>. (дата обращения: 15.02.2021)

13. Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томилина Т.М. Периодическая поверхностная структура с экстремальными акустическими свойствами // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 2. С. 147–151.

14. Mao S., Chen S., Huang C. Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines, *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.* 2005. Vol. 53. № 4. Pp. 1515–1521.

15. Szabo Zs., Park G., Hedge R., Li E. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship, *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.* 2010. Vol. 58. № 10. Pp. 2646–2653.

16. Fang N., Xi D., Xu J., Ambati M., Srituravanich W., Sun C., Zhang X. Ultrasonic metamaterials with negative modulus, *Nature*. 2006. Vol. 5. Doi: 10.1038/nmat1644. Epub 2006 Apr 30.

17. Astley R.J., Agarwal A., Holland K.R., Joseph P.F., Self R.H., Smith M.G., Sugimoto R., Tester B.J. Predicting and reducing aircraft noise // *Proc. 14th Intern. Congr. Sound and Vibr.* (Cairns, Australia, 2007). URL: https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf. (дата обращения: 26.09.2020)

18. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М. Научные основы создания упругих структур со специальными виброакустическими свойствами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 5. С. 3–11.

19. Sabine W.C. *Collected papers on acoustics*. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1923. 350 p.

20. Eyring C.F. Method of calculating the averaged coefficient of sound absorption // *J. Acoust. Soc. Am.* 1933. Vol. 4. Pp. 178–192.

21. Фанина Е.А. Разработка функциональных композиционных материалов для улучшения звукоизоляционных характеристик транспортных средств // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2012. № 59. С. 237–241.

Информация об авторах

Фанина Евгения Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: evgenia-@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 24.03.2021 г.

© Фанина Е.А., 2021

Fanina E.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: evgenia-@mail.ru

EFFICIENT ACOUSTIC COMPOSITE PANELS BASED ON GRAPHITE

Abstract. *A set of experimental studies is carried out to determine the acoustic characteristics of three-dimensional panels of fixed thickness made of carbon-based composite material installed in the opening between the reverberation chambers. Sound insulation indices are determined when they are excited by a diffuse sound field in wide frequency ranges. The reverberation time in model chambers with different partition configurations is calculated. The optimal configuration of the partition with pyramidal cells to reduce the reverberation time in the rooms is determined. The use of graphite in the form of thin membrane applied to various surfaces can significantly reduce the sound pressure levels in the room and increase the sound insulation indices of air noise. In addition to thin membrane, graphite can be used as an additive in composite materials for sound insulation purposes. It is shown that the characteristics of such panels are quite universal. The measured acoustic characteristics of composite panels are compared with similar characteristics of traditional materials. It is determined that the composition belongs to the I group of fire-retardant efficiency and can be recommended for use as a fire-retardant material. The developed acoustic material is an effective absorbing agent that solves problems in architectural acoustics, echo cancellation in construction and architecture. Similar to metamaterials, natural and artificial graphites allow to solve these problems with small volumes and masses using simple and inexpensive technologies.*

Keywords: *sound absorption, sound insulation index, composite panel, carbon-graphite material.*

REFERENCES

1. Kolyadin A.P. Formations and development of 1. Zwicker K., Kosten K. Sound-absorbing materials [Zvukopogloshchayushchie materialy]. Moscow: IL, 1952. 160 p. (rus)
2. Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers (theory, design, and applications). London: Spon Press, 2006. 405 p.
3. Handbook of noise and vibration control. Ed. Crocker M. J. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1570 p.
4. Aviation acoustics [Aviacionnaya akustika]. Ed. Munina A. G. and Kvitki V. E. M.: Mashinostroenie, 1973. 448 p. (rus)
5. Lopanov A.N., Fanina E.A., Tomarovshchenko O.N. Fundamentals of life safety [Osnovy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti]: a textbook. Belgorod: BSTU Publishing House. 2015. 224 p. (rus)
6. Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T. M., Morozov K.D., Bakhtin B.N. Potential of sound absorbers based on acoustic metamaterials. Proc. 23rd Intern. Congr. Sound and Vibr. (Athens, Greece, 2016). URL: https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_825_20160530175723879.pdf. (date of treatment: 11.12.2020)
7. Tomilina T.M., Bobrovnikskii Yu.I., Bakhtin B.N. Impedance design of efficient metamaterial sound absorbers. Proc. 24-th Intern. Congr. Sound and Vibr. (London, UK, 2017). https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1228_20170602183158834.pdf. (date of treatment: 03.02.2021)
8. Jimenez N., Huang W., Romero-Garcia V., Pagneux V., Groby J.-P. Ultrathin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. App. Phys. Lett. 2016. Vol. 109. No 121902. URL: http://perso.univ-lemans.fr/~jpgroby/Publication/ArticleAPL_2016.pdf. (date of treatment: 03.04.2021)
9. Jimenez N., Romero-Garcia V., Cebrecos A., Pico R., Sanchez-Morcillo V.J., Garcia-Raffi L.M. Broadband quasi perfect absorption using chirped multi-layer porous materials. AIP Advances. 2016. Vol. 6. No 121605. URL: https://noji-gon.webs.upv.es/pdf/2016-AIPAdv-Jimenez-layered_chirped_porous.pdf. (date of treatment: 03.04.2021)
10. Ng J., Chen H., Chan C.T. Metamaterial frequency-selective superabsorber. Optics Letts. 2009. Vol. 34. No 5. Pp. 644–646.
11. Popa B.I., Zigoneanu L., Cummer S.A. Tunable active acoustic metamaterials. Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. No 024303. URL: http://people.ee.duke.edu/~cummer/reprints/158_Popa13_ActiveAcousticMM.pdf. (date of treatment: 03.04.2021)
12. Popa B.I., Shinde D., Konneker A., Cummer S.A. Active acoustic metamaterials is reconfigurable in real time. Phys. Rev. B. 2015. Vol. 91. No. 220303. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.00453.pdf>. (date of treatment: 15.02.2021)
13. Bobrovnikskii, Y. I., Morozov K. D., T. M. Tomilina Periodic surface structure with extreme acoustic properties of the Classic. Journal. 2010. Vol. 56. No. 2. Pp. 147–151.
14. Mao S., Chen S., Huang C. Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines, IEEE Trans. Microw. Theory and Tech. 2005. Vol. 53. No. 4. Pp. 1515–1521.
15. Szabo Zs., Park G., Hedge R., Li E. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship, IEEE Trans. Microw. Theory and Tech. 2010. Vol. 58. No. 10. Pp. 2646–2653.
16. Fang N., Xi D., Xu J., Ambati M., Srituravanich W., Sun C., Zhang X. Ultrasonic metamaterials with negative modulus, Nature. 2006. Vol. 5. Doi: 10.1038/nmat1644. Epub 2006 Apr 30.
17. Astley R.J., Agarwal A., Holland K.R., Joseph P. F., Self R.H., Smith M.G., Sugimoto R., Tester B.J. Predicting and reducing aircraft noise. Proc. 14-th Intern. Congr. Sound and Vibr. (Cairns, Australia, 2007). URL: https://acoustics.asn.au/conference_proceed-ings/ICSV14/papers/p819.pdf. (date of treatment: 26.09.2020)
18. Bobrovnikskiy Yu. I., Tomilina T. M. Scientific bases of creation of elastic structures with special vibroacoustic properties. Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2014. No. 5. Pp. 3–11.
19. Sabine W.C. Collected papers on acoustics. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1923. 350 p.
20. Eyring C. F. Method of calculating the averaged coefficient of sound absorption. J. Acoust. Soc. Am. 1933. Vol. 4. Pp. 178–192.
21. Fanina E. A. Development of functional composite materials for improving the sound insulation characteristics of vehicles [Razrabotka funkcional'nyh kompozicionnyh materialov dlya uluchsheniya zvukoizolyacionnyh harakteristik transportnyh sredstv]. Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University. 2012. No. 59. Pp. 237–241. (rus)

Information about the authors

Fanina, Evgeniya A. DSc, Professor. E-mail: evgenia-@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 24.03.2021

Для цитирования:

Фанина Е.А. Эффективные акустические композиционные панели на основе графита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 82–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90

For citation:

Fanina E.A. Efficient acoustic composite panels based on graphite. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 82–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-82-90