

Н.Г. КАНЕВ^{1,2}, А.Р. ДОЛГЕР²¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия²Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

СНИЖЕНИЕ ШУМА ЭКРАНОМ В ВИДЕ РЕШЕТКИ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИН

Аннотация. Вентилируемые звукоизоляционные конструкции сегодня востребованы для защиты зданий и территорий от шума технологического оборудования, для штатной работы которого требуется подача воздуха. Проектировщиками уделяется значительное внимание разработке продуваемых шумозащитных экранов, хотя стандартизованных и справочных методик по расчету их акустической эффективности практически нет. В связи с этим актуальными являются исследования экранов ламельного типа, позволяющие решить задачу шумопонижения и воздухообмена. Частным случаем ламельного экрана является решетка с параллельными прорезями, расчету прохождения звука через такую конструкцию посвящена данная статья. Снижение шума экраном в виде тонких пластин, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, рассчитывается методом конечных элементов. В работе описана постановка численного эксперимента, введен параметр, характеризующий эффективность снижения шума экраном и представлены результаты расчета этого параметра в зависимости от геометрических размеров решетки и частоты звука. Показано, что эффективность экрана определяется соотношением между шириной пластин и зазором между ними: чем это отношение меньше, тем выше эффективность. Определены параметры решетки, при которых обеспечивается снижение шума не менее 10 дБ. Результаты работы могут непосредственно применяться для проектирования звукоизолирующих вентиляционных решеток и продуваемых шумозащитных экранов.

Ключевые слова: шумозащитный экран, звукоизоляция, метод конечных элементов, дифракция.

N.G. KANEV^{1,2}, A.R. DOLGER²¹Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

NOISE REDUCTION BY A BARRIER IN THE FORM OF A SOLID PLATE GRID

Abstract. Ventilated Soundproofing Structures are widely used today to protect buildings and adjacent areas from noise generated by industrial equipment that requires air supply for normal operation. Designers pay considerable attention to the development of ventilated noise barriers, even though standardized or reference methods for calculating their acoustic performance are virtually nonexistent. In this context, research on louver-type screens, which provide both noise reduction and airflow, is highly relevant. A specific case of a louvered screen is a grille with parallel slits—this article focuses on the calculation of sound transmission through such a structure. The noise reduction provided by a screen consisting of thin plates spaced at equal intervals is calculated using the finite element method. This paper describes the numerical experiment setup, introduces a parameter characterizing the noise reduction efficiency of the screen, and presents the calculated results of this parameter depending on the grille's geometric dimensions and sound frequency.

It is shown that the screen's efficiency is determined by the ratio between the plate width and the gap between them: the smaller this ratio, the higher the efficiency. The study identifies grille parameters that ensure noise reduction of at least 10 dB. The results can be directly applied to the design of soundproof ventilation grilles and ventilated noise barriers.

Keywords: noise shield, sound insulation, finite element method, diffraction.

1. Введение

Технологическое оборудование различного назначения является источником шума в зданиях и городской застройке. Стандартным средством борьбы с шумом источников, расположенных на открытых пространствах, например, на кровлях зданий или на поверхности, являются шумозащитные экраны – сплошные и достаточно массивные конструкции, устанавливаемые вблизи шумящего оборудования [1]. Снижение шума происходит за счет дифракции звуковых волн на экране, для расчета которой известны простые подходы [2]. Эффективность снижения шума экраном определяется, главным образом, его размерами. По требованиям конструкционной надежности высота экранов редко превышает 6 м, что ограничивает возможности снижения шума, поэтому для увеличения эффективности без изменения высоты в литературе рассматриваются разные способы: применение звукопоглощающих экранов [3], насадки на верхней кромке [4,5].

Другим аспектом использования экранов для снижения шума оборудования является сохранение приемлемых условий для его работы. Для установок систем вентиляции и кондиционирования воздуха, электрогенераторов требуется подача воздуха, а окружение установки экраном приводит к нарушению воздухообмена. Поэтому возникает два противоречивых требования к решению по шумозащите. Во-первых, акустическая эффективность должна быть высокой, для этого требуется герметичность конструкции, а, во-вторых, необходима продуваемость конструкции, что, напротив, может быть обеспечено только негерметичными конструкциями. Компромиссным решением являются экраны ламельного типа (рисунок 1) – конструкции из отдельных пластин, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Наличие значительного зазора между ламелями позволяет обеспечить переток воздуха сквозь экран.

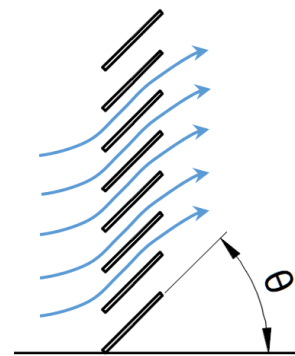


Рисунок 1 – Шумозащитный экран ламельного типа (стрелки указывают направление потока воздуха)

Снижение шума ламельным экраном зависит от нескольких параметров: длина ламелей, шаг между ними, угол наклона ламелей, обозначенный θ на рисунке 1. Кроме этого, важное значение имеют акустические свойства поверхности панелей. Расчет дифракции звуковых волн на такой структуре представляет собой сложную математическую задачу, решения которой для идеальных поверхностей представлены в классических монографиях [6-8]. В общем виде задача дифракции скалярных волн на бесконечной структуре бесконечно тонких абсолютно жестких экранов в постановке на рис. 1 содержится в работе [9]. Отметим, что теория дифракции на импедансных экранах ламельного типа сегодня в полной мере не описана, хотя некоторые частные задачи хорошо изучены [10]. Однако интерес с практической точки зрения к таким экранам достаточно большой, поэтому для их исследования используют лабораторные [11,12] и численные [13] эксперименты.

Предельные случаи экрана на рисунке 1 таковы. При $\theta = 0^\circ$ экран является пластинчатым глушителем, нашедшем широкое применение в практике борьбы с шумом [14]. При $\theta = 90^\circ$ экран становится дифракционной решеткой, преимуществом которой является минимальная толщина конструкции, что нередко является востребованным в стесненных

условиях строительства. В связи с этим представляет интерес оценить потенциальную эффективность снижения шума решетками и выяснить их геометрические параметры, при которых применение решетчатых экранов имеет практическое значение с акустической точки зрения.

В настоящей работе решается задача о прохождении звуковой волны сквозь решетчатую структуру методом конечно-элементного моделирования. Постановка задачи формулируется в простом виде, что позволяет выполнить наглядный численный эксперимент и получить простые оценки акустической эффективности решеток.

2. Модели и методы

В первую очередь опишем математическую постановку задачи. Рассматривается двумерное пространства, в котором справедливо уравнение Гельмгольца для гармонических колебаний:

$$\Delta p + k^2 p = 0, \quad (1)$$

где p – звуковое давления, Δ – оператор Лапласа, $k = \omega/c$ – волновое число, ω – круговая частота, c – скорость звука в среде.

Пластины, образующие решетку, имеют прямоугольное сечение с размерами l и h , расстояние между пластинами d . Далее полагаем, что $h \ll l$. Все поверхности пластин принимаются абсолютно жесткими, на них выполняется граничное условие:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности.

Решетка пластин расположена в плоскости $x = 0$. Вдоль оси x распространяется плоская звуковая волна, падающая нормально на решетку пластин. Постановка задачи приведена на рисунке 2.

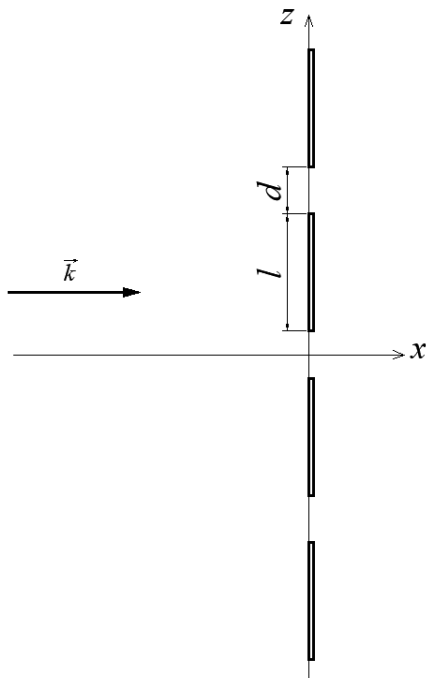


Рисунок 2 – Плоская решетка пластин

Задача состоит в нахождении поля за решеткой и определении снижения уровня звука, прошедшего сквозь решетку в зависимости от ширины пластин l и зазора между ними d . Для расчета звукового поля согласно (1) и (2) применяется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Comsol Multiphysics.

Приведем описание численного эксперимента, схема которого приведена на рисунке 3. Расчетная область, являющаяся воздушным пространством, имеет размер 20×30 м, ось x направлена по горизонтали, ось y – по вертикали. Для трех границ применено импедансное граничное условие для минимизации отражаемого ими звука, импеданс границ принят равным характеристическому импедансу среды ρc , где ρ – плотность воздуха, c – скорость звука в нем. Четвертая граница области является источником плоской звуковой волны, это плоскость, осциллирующая с частотой ω и амплитудой скорости v . Решетка расположена в плоскости $x = 9$ м. В качестве характеристики падающего на решетку поля принимается значение

уровня звукового давления L_A , усредненного по области А. Аналогичным образом характеризуется поле за решеткой – рассчитывается средний уровень звукового давления L_B по области Б.

Снижение звука решеткой определяется как разность между этими значениями, которая фактически является звукоизоляцией конструкции:

$$R = L_A - L_B \quad (3)$$

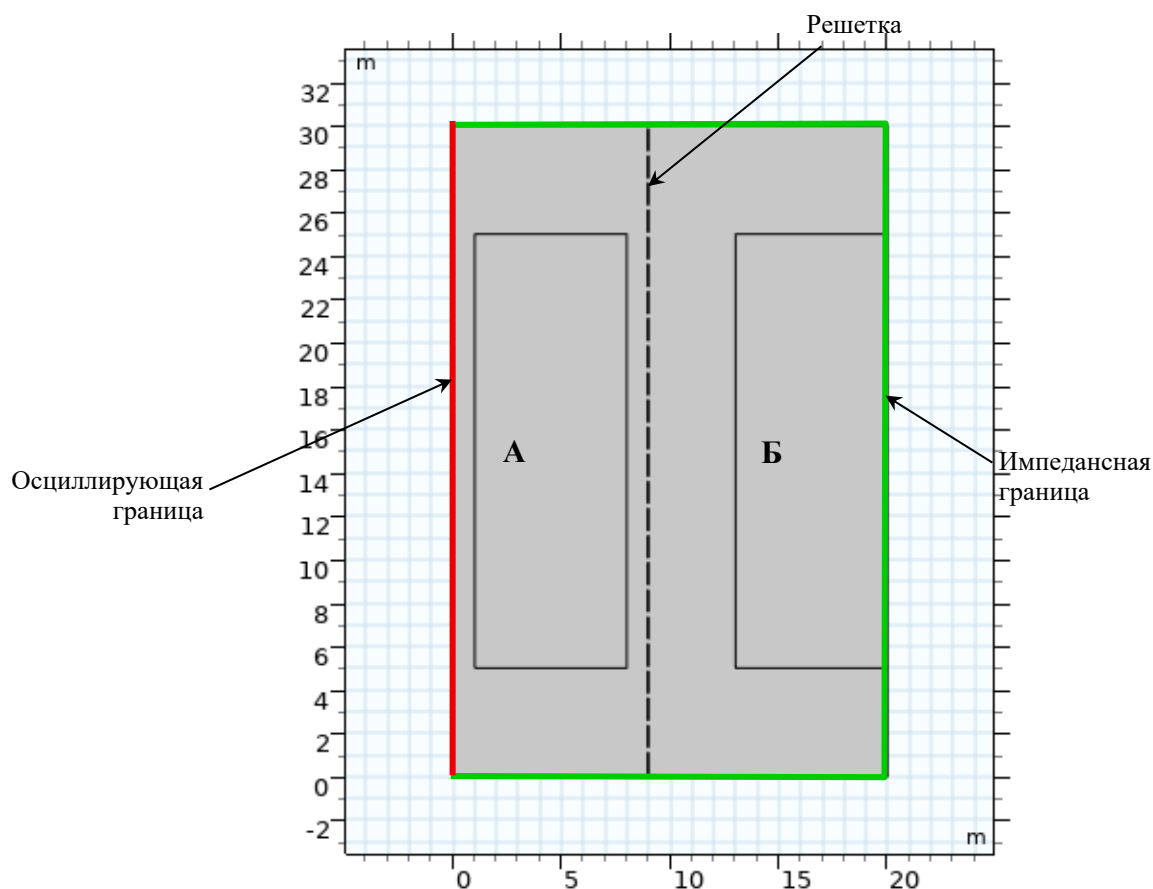


Рисунок 3 – Схема численного эксперимента

На рисунке 4 приведен пример расчета уровня звукового давления для частоты 125 Гц и амплитуды колебаний 1 мм/м осциллирующей границы при следующих параметрах решетки: $l = 1$ м, $h = 0.05$ м, $d = 0.1$ м. На расчетной области справа отсутствует решетка, здесь наблюдается распространение плоской волны вдоль оси x без значительного изменения вдоль направления распространения за исключением верхней и нижней границы, где волновой фронт несколько искажается. При этом область, в которой можно считать приближение плоской волны справедливым, ограничена плоскостями $y = 2$ м и $y = 28$ м. Таким образом, зоны А и Б, выбранные для расчета, соответствуют постановке задачи. На расчетной области слева представлено распределение уровня звукового давления при наличии решетчатого экрана. Экран заметно отражает звук: в области перед экраном, ограниченной плоскостями $x = 0$ и $x = 9$ м, падающая и отраженная волна в результате интерференции образуют стоячую волну, пучности которой проявляются в виде красных полос. За экраном уровень звукового давления ниже, при этом наблюдается сложная интерференционная картина. Сравнение расчета с экраном и без него показывает значительное снижение проходящего шума.

Необходимо отметить одно существенное обстоятельство: решетка пластин оказывает влияние на излучения звука осциллирующей границей. Дело в том, что отраженная волна акустически нагружает границу из-за суперпозиции, падающей и отраженной волн, что при зафиксированной скорости колебаний границы увеличивает излучаемую звуковую мощность, что приводит к увеличению уровня звука в области перед экраном. Таким образом, интенсивность падающего на решетку поля также возрастает, поэтому сравнение звукового давления в области Б при наличии экрана и без него не является корректным. По этой причине

для оценки снижения проходящего через экран звука выбрана разница уровней звукового давления перед экраном и за ним.

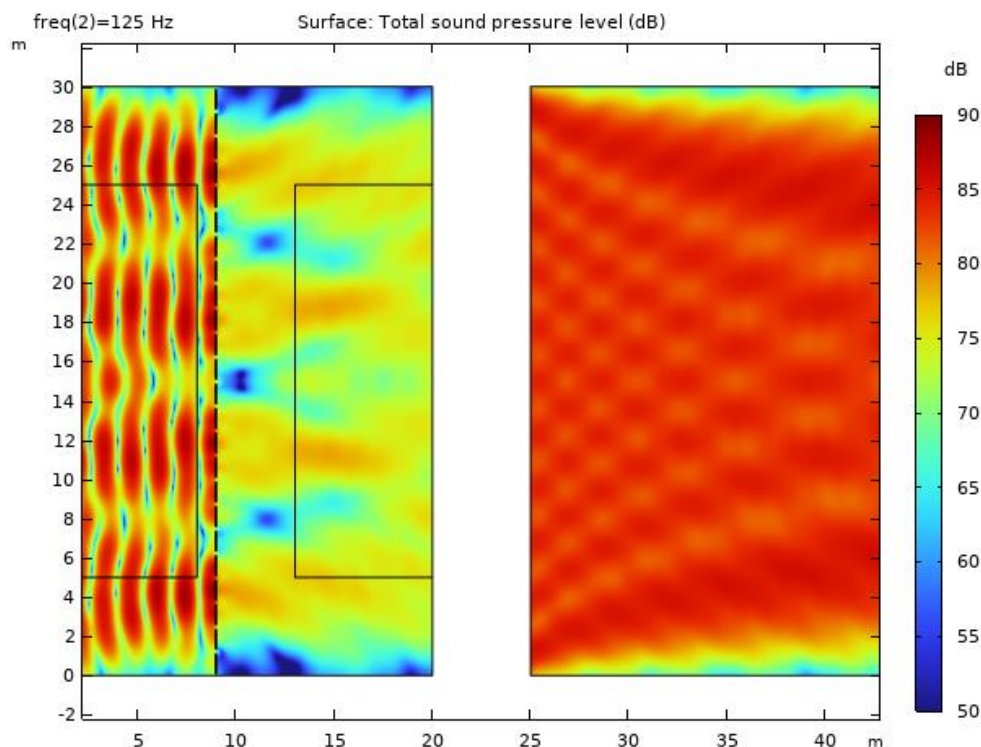


Рисунок 4 – Результат расчета звукового поля на частоте 125 Гц (слева – расчет с решетчатым экраном, справа – без него)

По результатам расчета, приведенного на рисунке 4, определены средние значений уровней звукового давления для областей А и Б, которые составили 78.3 дБ и 73.3 дБ соответственно. Согласно (3) снижение шума решеткой составляет $R = 5.0$ дБ. Аналогичные расчеты проведены для решеток с разной длиной пластин и разным зазором между ними, а также на различных частотах.

3. Результаты исследования и их анализ

Моделирование распространения звука через решетчатый экран проведена для 11 значений зазора d и 5 значений длины пластин l . Для каждого из 55 расчетов построено распределение уровня звукового давления по аналогии с рисунком 4, определены средние значения по областям А и Б и рассчитана эффективность R согласно (3).

Согласно постановке задачи эффективность экрана R зависит от трех параметров: длины пластин l , зазора между ними d и частоты ω . Пластины можно считать достаточно тонкими, поэтому влияние их толщины h на результаты моделирования невелико. Удобно ввести безразмерные параметры kl и kd в качестве аргументов функции R . На рисунке 5 представлены сводные результаты выполненных расчетов в виде зависимости снижения шума решетчатым экраном R в зависимости от ширины зазора kd для различных значений длины kl .

Проанализируем результаты расчетов. Эффективность экрана R уменьшается с увеличением расстояния между пластинами, при этом значение R стремится к нулю, т.е. при больших зазорах между пластинами рассмотренная конструкция становится звукопрозрачной, что физически очевидно. Увеличение ширины пластин приводит к росту эффективности по неизменном расстоянии между ними. Наибольшее снижение проходящего шума составляет 18.7 дБ для наибольшей ширины панелей и наименьшего зазора. В этом смысле геометрия

экрана не может быть оптимальной: наибольшая эффективность снижения звука достигается при наименьшем возможном зазоре и наибольшей ширине панелей, при стремлении отношения d/l к нулю, т.е. к сплошному экрану.

Для практических задач важно определить размеры решетчатого экрана, при которых обеспечивается хорошая эффективность снижения шума, например, не хуже 10 дБ. По кривым на рисунке 5 можно найти значения kd для каждой кривой, при которых R составляет 10 дБ. Полученная зависимость приведена на рисунке 6.

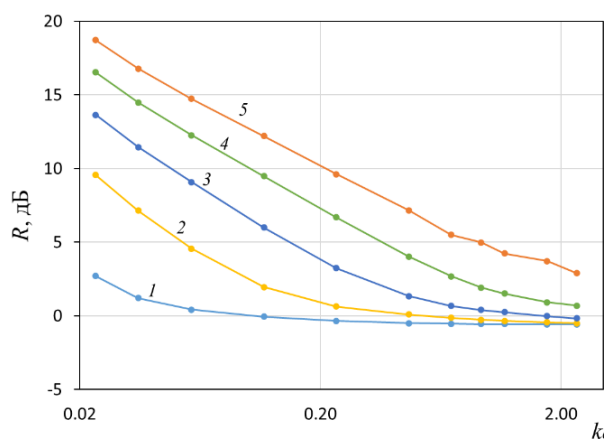


Рисунок 5 – Результат расчета снижения шума решетчатым экраном

1 – $kl=0.6$; 2 – $kl=1.2$; 3 – $kl=1.8$; 4 – $kl=2.4$;
5 – $kl=3.0$

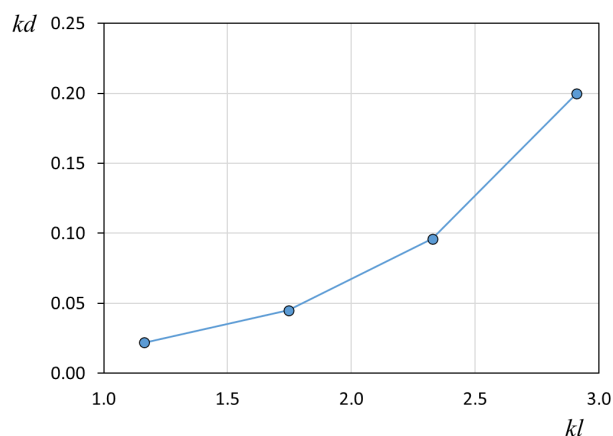


Рисунок 6 – Геометрические параметры решетки, при которых обеспечивается снижение проходящего шума на 10 дБ

График на рисунке 6 может использоваться для подбора параметров решетчатых экранов для обеспечения требуемой акустической эффективности. Например, если ширина панелей и расстоянием между ними таковы, что соответствующая точка лежит ниже кривой, то снижение шума составит не менее 10 дБ. Заметим, что на рисунках 5 и 6 непосредственно не фигурирует частота звука, поэтому выполнение требования должно быть проверено для каждой частоты из рабочего диапазона.

Полученные значения эффективности экранов решетчатого типа в общем случае невелики, только при малых зазорах по сравнению с шириной панели обеспечивается существенное снижение шума. Развитием данного подхода является применение двойных решеток экранов, которые, как показывают исследования в смежных областях [15], позволяют значительно снизить проходящее через экран звуковое поле.

При проектировании и строительстве вентилируемых экранов в виде плоских решеток особого внимания требуют вопросы продуваемости конструкции, что выходит за рамки настоящего исследования. Очевидно, что узкие зазоры не всегда обеспечат необходимо продувание, поэтому задача разработки экранирующего препятствия в общем случае сложнее: кроме акустических требований нужно учитывать и аэродинамические.

4. Заключение

В работе проведено численное моделирование снижения шума экраном решетчатого типа, по результатам которого:

1. Получена зависимость эффективности снижения шума экраном от его геометрических размеров;
2. Показано, что снижение шума экраном тем выше, чем больше ширина панелей и чем меньше зазор между ними;
3. Для практических расчетов найдены соотношения между геометрическими размерами решетчатого экрана, при которых снижение шума составит не менее 10 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубин И.Л., Цукерников И.Е., Николов Н., Писарски А. Основы проектирования транспортных шумозащитных экранов. Москва: Изд. дом «БАСТЕТ», 2015. 207 с.
2. Maekawa Z. Noise reduction by screens // Appl. Acoust. 1968. V. 1. P. 157–173.
3. Комкин А.И., Назаров Г.М. Особенности дифракции звука на звукопоглощающем экране // Акуст. журн. 2021. №3(67). С. 303–307.
4. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers // Build. Acoust. 2003. V.10. P. 289–323.
5. Урусовский И.А. Дифракция звука на экране с всеерной насадкой // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 86–95.
6. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. Москва: Сов. Радио, 1966. 431 с.
7. Неведов Е.И. Асимптотическая теория дифракции электромагнитных волн на конечных структурах. Москва: Наука, 1972. 204 с.
8. Миттра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. Москва: Мир, 1974. 327 с.
9. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens // Wave Motion. 1986. V. 8. P. 225–234.
10. Шанин А.В., Корольков А.И. Отражение волны от дифракционной решетки, составленной из поглощающих экранов. Описание в рамках метода Винера–Хопфа–Фока // Акуст. журн. 2014. № 6 (60). С. 587–595.
11. Viveiros E.B., Gibbs B.M., Gerges S.N.Y. Measurement of sound insulation of acoustic louvres by an impulse method // Appl. Acoust. 2002. V.63. P.1301–1313.
12. Strazdas E., Januševičius T. Development of louvered noise barrier with changeable sound insulation from waste tire rubber and investigation of acoustic properties // 2024. Sustainability. V.16. No.6. 2567.
13. Канев Н.Г., Маяк А.А. Оценка эффективности шума экраном ламельного типа // Конференция «Акустика среды обитания»: матер. конф. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 125–132.
14. Борьба с шумом на производстве: Справочник. Москва: Машиностроение, 1985. 400 с.
15. Naqvi S.B., Ayton L.J. Acoustic scattering by multi-layered gratings // J. Sound Vib. 2025. V.106. 119083.

REFERENCES

1. Shubin I.L., Cukernikov I.E., Nikolov N., Pisarski A. Osnovy proektirovaniya transportnyh shumozashchitnyh ekranov. Moscow: Izd. dom «BASTET», 2015. 207 p. (rus)
2. Maekawa Z. Noise reduction by screens. Applied Acoustics. 1968. Vol. 1. Pp. 157–173.
3. Komkin A.I., Nazarov G.M. Features of Sound Diffraction by a Noise Absorbing Screen. Acoustical Physics. 2021. Vol. 67. Pp. 298–301.
4. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers. Building Acoustics. 2003. Vol. 10. Pp. 289–323.
5. Urusovskii I.A. Sound diffraction by a barrier with a fan-shaped headpiece. Acoustical Physics. 2013. Vol. 59. Pp. 76–85.
6. Vajnshtejn L.A. Teoriya difrakcii i metod faktorizacii. Moscow: Sov. Radio, 1966. 431 p. (rus)
7. Nefedov E.I. Asimptoticheskaya teoriya difrakcii elektromagnitnyh voln na konechnykh strukturah. Moscow: Nauka, 1972. 204 p. (rus)
8. Mittra R., Li S. Analiticheskie metody teorii volnovodov. Moscow: Mir, 1974. 327 p. (rus)
9. Achenbach J.D., Li Z.L. Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens. Wave Motion. 1986. Vol. 8. Pp. 225–234.
10. Shanin A.V., Korol'kov A.I. Wave reflection from a diffraction grating consisting of absorbing screens: Description in terms of the Wiener-Hopf-Fock method. Acoustical Physics. 2014. Vol. 60. Pp. 624–632.
11. Viveiros E.B., Gibbs B.M., Gerges S.N.Y. Measurement of sound insulation of acoustic louvres by an impulse method. Applied Acoustics. 2002. Vol. 63. Pp. 1301–1313.
12. Strazdas E., Januševičius T. Development of louvered noise barrier with changeable sound insulation from waste tire rubber and investigation of acoustic properties. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 6. 2567.
13. Kanev N.G., Mayak A.A. Ocenka effektivnosti shuma ekranom lamel'nogo tipa. Konferenciya «Akustika sredy obitaniya»: mater. konf. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman, 2023. Pp. 125–132. (rus)
14. Bor'ba s шумом на производстве: Spravochnik. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 400 p. (rus)
15. Naqvi S.B., Ayton L.J. Acoustic scattering by multi-layered gratings. Journal of Sound and Vibration. 2025. Vol. 106. 119083.

Информация об авторах

Канев Николай Георгиевич

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук г. Москва, Россия, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией №42 «Акустика залов»
E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Долгер Александр Романович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды
E-mail: a.dolger@yandex.ru

Information about authors

Kanev Nikolay G.

Research Institute of Building Physics, Moscow, Russia
doctor in phys.-math. sc., head of the dep. of hall acoustics
E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Dolger Alexandr R.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics
E-mail: a.dolger@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 14.08.2025

The article was submitted 19.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 14.08.2025