

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ШУМОЗАЩИТНЫХ ПЕНОАЛЮМИНИЕВЫХ ЭКРАНОВ

Туркина Н.Р., Син Шибо, Го Минсюй

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

Ключевые слова: пеноалюминий, стальная сэндвич-панель, шумозащитный экран, ветровая нагрузка, расчет на прочность, сейсмический отклик.

Аннотация. Для исследования напряженно-деформированного состояния и акустических характеристик пеноалюминиевых композитных шумозащитных экранов при различной высоте и различных видах нагрузок были построены конечно-элементные модели высотой 2 м, 4 м и 6 м. В расчетах прочности пеноалюминий рассматривался как эквивалентный линейно-упругий материал, в акустических расчетах его свойства описывались с использованием модели пористой среды Джонсона-Шампу-Аллара (JCA). Были выполнены следующие виды расчетов: статический расчет под действием силы тяжести, расчет при совместном действии силы тяжести и поперечной ветровой нагрузки, расчет временного отклика при сейсмическом воздействии величиной 0,2g (ускорение, равное 20% от силы земного притяжения $9,81 \text{ м/с}^2$), а также двумерный расчет шумоподавления при воздействии точечного источника звука в диапазоне 20-3000 Гц. Результаты показали, что деформация конструкции под действием силы тяжести незначительна, а ветровая нагрузка является основным фактором, определяющим статический отклик. С увеличением высоты шумозащитного экрана пиковое перемещение модели высотой 6 м при сейсмическом воздействии возрастает более заметно, при этом значения снижения шума также увеличиваются. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для проектирования конструкции и оптимизации акустических параметров пеноалюминиево-стальных композитных шумозащитных экранов.

STRENGTH AND STABILITY ANALYSIS OF NOISE BARRIERS MADE OF ALUMINUM FOAM

Turkina N.R., Sin Shibo, Guo Mingxu

Baltic State Technical University "VOENMEH" n.a. D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

Keywords: aluminum foam, steel sandwich panel, noise barrier, wind load, structural analysis, seismic response.

Abstract. To investigate the stress-strain state and acoustic characteristics of aluminum foam composite noise barriers under various heights and loading conditions, finite element models with heights of 2 m, 4 m, and 6 m were developed. In the structural strength calculations, the aluminum foam was treated as an equivalent linear-elastic material, whereas in the acoustic calculations, its properties were described using the Johnson–Champoux–Allard (JCA) porous medium model. Analyses were performed to determine the static response under gravity, the response under the combined action of gravity and transverse wind load, and the transient response to a 0.2g seismic event; additionally, a two-dimensional analysis of insertion loss was conducted for a point sound source in the 20-3000 Hz range. The results indicated that structural deformation due to gravity is negligible, while wind load is the primary factor determining the static response. As the height of the noise barrier increases, the peak seismic displacement of the 6-meter-high model rises more significantly, while its broadband insertion loss also increases. The obtained results can be used as a basis for the structural design and optimization of the acoustic parameters of aluminum foam–steel composite noise barriers.

Введение, постановка задачи

Эффективность шумозащитных экранов зависит не только от геометрических параметров, таких как высота и толщина, но также от конструктивного решения панели, свойств материалов и способа установки. Поэтому при проектировании таких экранов необходимо учитывать не только акустические характеристики, но и отклик конструкции под действием собственного веса, ветровой нагрузки и сейсмического воздействия [1].

В данной работе рассматривается стальной пеноалюминиевый композитный шумозащитный экран. Применение пеноалюминия в качестве сердечника в сочетании со

стальной оболочкой позволяет сформировать композитную сэндвич-конструкцию, сочетающую достаточную жёсткость и акустическую эффективность [2, 3]. Для анализа его структурного отклика и акустических характеристик были построены численные модели высотой 2 м, 4 м и 6 м. В прочностной части расчёта исследовались изменения перемещений и напряжений под действием собственного веса, ветрового давления и горизонтального сейсмического ускорения; в акустической части эффективность экранов различной высоты оценивалась по среднему уровню звукового давления в прямоугольной области за экраном и по вносимым потерям.

Методы, ход работы и анализ результатов

Геометрическая модель представляет собой стальной пеноалюминиевый композитный шумозащитный экран. Общая толщина панели составляет 100 мм: передний и задний стальные листы имеют толщину по 2 мм, а между ними расположен пеноалюминиевый сердечник толщиной 96 мм. Ширина панели принята равной 1000 мм. По высоте экран состоит из отдельных секций высотой 500 мм. Каждая секция включает пеноалюминиевый сердечник, заключённый в стальную оболочку. Модели высотой 2 м, 4 м и 6 м состоят соответственно из 4, 8 и 12 секций. Панель установлена в пазы боковых стальных стоек, а нижняя часть конструкции связана с бетонным основанием. Такая схема позволяет рассматривать экран как единую конструкцию при действии собственного веса, ветровой нагрузки и эквивалентного сейсмического воздействия [4, 5].

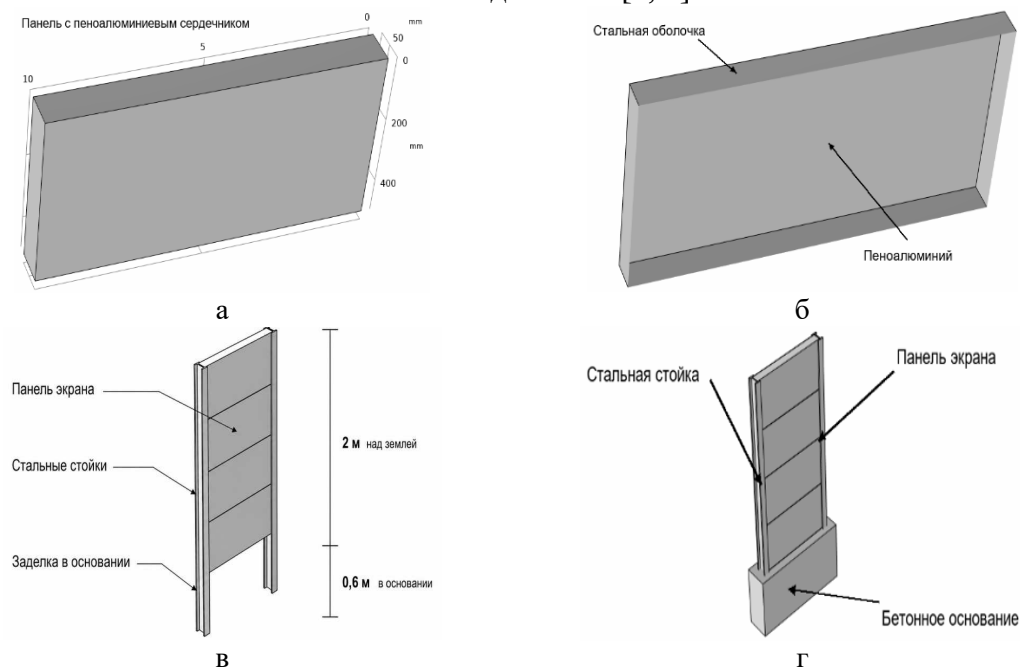


Рис. 1. Геометрическая модель шумозащитной панели: а) композитная панель; б) стальная оболочка и пеноалюминиевый сердечник; в) модель со стальными стойками; г) модель с бетонным основанием

В данной работе оболочка шумозащитного экрана была выполнена из стали. В расчётах прочности пеноалюминий рассматривался как эквивалентное сплошное линейно-упругое тело, что позволяет анализировать общие перемещения и распределение напряжений; в акустических расчётах пеноалюминий описывается с помощью модели пористой среды JCA, что позволяет учитывать его пористую структуру и способность к рассеянию звуковой энергии [6,7]. Основные физико-механические свойства материалов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Физико-механические свойства стали и пеноалюминия

Параметр материала	Сталь	Пеноалюминий
Плотность	7850 кг/м ³	270 кг/м ³
Модуль Юнга	200 ГПа	0,5 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,30	0,25

Направление силы тяжести задавалось вертикально вниз в соответствии с реальным физическим положением конструкции, а собственный вес моделировался в виде объёмной нагрузки. Согласно результатам расчёта, максимальное полное перемещение и максимальное вертикальное перемещение для моделей трёх высот практически совпадают. Это показывает, что под действием собственного веса деформация конструкции происходит главным образом в вертикальном направлении и проявляется в виде незначительного сжатия и локальной деформации в зоне опор, тогда как поперечное перемещение очень мало и им можно пренебречь. При увеличении высоты шумозащитного экрана с 2 м до 6 м максимальное перемещение возрастает с 0,002 мм до 0,010 мм. Это связано главным образом с тем, что при увеличении высоты возрастает общая масса конструкции, а собственный вес передаётся вниз через более длинные стальные листы и пеноалюминиевый сердечник, что приводит к соответствующему увеличению общей деформации. Максимальное напряжение возрастает с 1,20 МПа до 3,91 МПа, однако остаётся значительно ниже предела текучести обычной конструкционной стали (табл. 2, рис. 2). Следовательно, при принятых в работе параметрах материалов и условиях закрепления собственный вес оказывает незначительное влияние на отклик конструкции и не является основным фактором, определяющим прочность и жёсткость шумозащитного экрана [8,9].

Табл. 2. Результаты расчёта шумозащитного экрана под действием собственного веса

Высота, м	Максимальное полное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа
2	0,002	1,20
4	0,005	2,73
6	0,010	3,91

В данной работе также рассматривался общий статический отклик панели шумозащитного экрана при различных уровнях ветрового давления. Поэтому ветровая нагрузка была упрощённо представлена в виде равномерного статического давления, приложенного перпендикулярно к наветренной поверхности. В расчётах были приняты эквивалентные значения ветрового давления 0,3; 0,5 и 0,8 кПа. Такой подход позволяет напрямую задавать величину нагрузки и удобен для сравнительного анализа моделей различной высоты. При этом в расчётах с ветровой нагрузкой сохранялся учёт собственного веса конструкции, что лучше соответствует фактическому напряжённому-деформированному состоянию после установки. Максимальные напряжения, напротив, увеличиваются с ростом высоты и ветрового давления (табл. 3, рис. 3). При давлении 0,8 кПа максимальное напряжение возрастает с 8,86 МПа для модели высотой 2 м до 69,04 МПа для модели высотой 6 м.

Табл. 3. Результаты расчёта шумозащитного экрана при различных значениях ветрового давления

Высота, м	Ветровое давление, кПа	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа
2	0,3	0,11	4,04
2	0,5	0,18	5,97
2	0,8	0,28	8,86
4	0,3	1,24	13,90
4	0,5	2,07	21,56
4	0,8	3,31	33,05
6	0,3	5,65	28,11
6	0,5	9,42	44,48
6	0,8	15,07	69,04

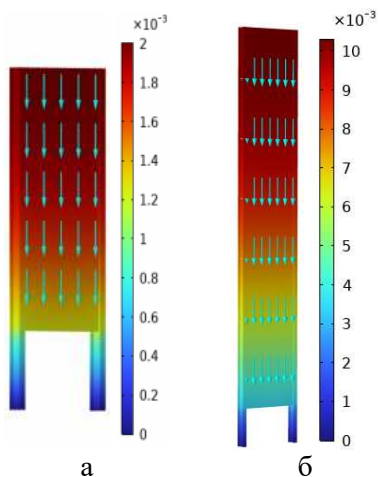


Рис. 2. Максимальное полное перемещение (мм) под действием собственного веса моделей высотой: а) 2 м, б) 6 м

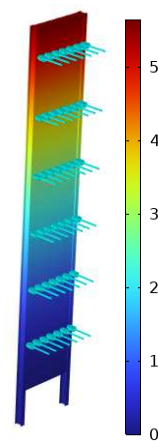


Рис. 3. Полное перемещение (мм) модели высотой 6 м при ветровом давлении 0,3 кПа

Для проведения упрощённого расчёта динамического воздействия использовались модели шумозащитного экрана высотой 2 м, 4 м и 6 м. Низкая плотность пеноалюминия способствует уменьшению общей массы конструкции и, соответственно, снижению инерционных сил при сейсмическом воздействии. В тоже время его сравнительно низкий модуль упругости влияет на общую жёсткость панели и её собственные частоты. В реальных условиях пеноалюминий при сжатии и циклическом нагружении может обладать определённой способностью к рассеянию энергии, однако в данной модели он рассматривался как линейно-упругий материал, без учёта пластических деформаций и гистерезисных эффектов. Поэтому данный расчёт отражает главным образом влияние массы и жёсткости пеноалюминия на динамический отклик конструкции и не позволяет напрямую оценить его реальную способность к сейсмическому демпфированию.

Сейсмическое воздействие задавалось в виде горизонтального ускорения с пиковым значением 0,2g. Для рассматриваемых моделей использовалось одинаковое значение ускорения, что позволило сравнить влияние высоты на перемещения и напряжения. Результаты расчёта показали, что с увеличением высоты шумозащитного экрана полное перемещение при сейсмическом воздействии в целом возрастает. Максимальное полное перемещение модели высотой 2 м составляет 0,29 мм; для модели высотой 6 м это значение увеличивается до 15,87 мм, что указывает на более выраженный горизонтальный отклик высокой конструкции. Максимальные напряжения остаются небольшими, при этом наибольшее значение получено для модели высотой 6 м и составляет 72,66 МПа.

Табл. 4. Результаты расчёта шумозащитного экрана при сейсмическом воздействии нагрузки 0,2g

Высота, м	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа
2	0,29	9,13
4	3,47	34,59
6	15,87	72,66

Акустический расчёт был выполнен на основе двумерной модели поперечного сечения. В этой постановке шумозащитный экран рассматривается как конструкция, протяжённая в направлении ширины, что позволяет учитывать дифракцию звуковых волн через его верхнюю кромку. Такой подход был использован для сопоставления акустической эффективности экранов высотой 2 м, 4 м и 6 м. Расчётная область включала воздушную среду, стальную оболочку и пеноалюминиевый сердечник. Стальная оболочка задавалась в модели механики твёрдого тела, воздушная область – в модели акустики давления, а пеноалюминиевый сердечник описывался с использованием модели пористой среды JCA.

Высота воздушной области составляла 10 м. Экран располагался вертикально на поверхности земли. Точечный источник звука был размещён со стороны падающей волны на расстоянии 3 м от экрана и на высоте 1,5 м. Источник задавался как двумерный точечный источник со звуковым давлением 1 Па. Для оценки звукового поля за экраном была задана прямоугольная расчётная область шириной 2 м и высотой 1 м. В этой области определялся средний уровень звукового давления. Вносимые потери IL рассчитывались как разность между средним уровнем звукового давления $L_{p,0}$ в расчётной области без экрана и средним уровнем звукового давления $L_{p,e}$ в той же области при наличии шумозащитного экрана:

$$IL = L_{p,0} - L_{p,e} . \quad (1)$$

Такой способ оценки позволяет уменьшить влияние локальных колебаний звукового давления, которые могут возникать из-за дифракции волн, отражения от поверхности земли и интерференции в зоне за экраном [10]. Акустические свойства пеноалюминия задавались с помощью модели JCA. В рамках этой модели пеноалюминий рассматривается как эквивалентная жидкая среда. Данный подход не описывает непосредственно упругие колебания твёрдого каркаса, а учитывает главным образом потери энергии в воздухе, схема расчётной области представлена на рисунке 4. Расчётная область расположена на расстоянии 1 м за экраном. В расчёте были использованы следующие параметры: пористость – 0,95, сопротивление воздушному потоку – 35000 Па·с/м², извилистость – 1,1, вязкостная характеристическая длина – 0,25 мм, тепловая характеристическая длина – 0,50 мм.

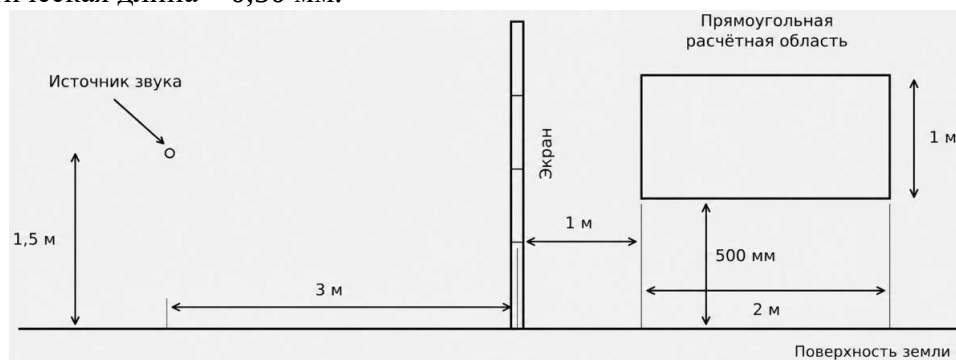


Рис. 4. Схема акустической модели с источником звука и прямоугольной расчётной областью

На рисунке 5 представлены значения среднего уровня звукового давления в прямоугольной области за шумозащитными экранами высотой 2 м, 4 м и 6 м. Видно, что уровень звукового давления заметно изменяется с частотой, что связано с дифракцией звука на верхней кромке экрана, отражением от поверхности земли и интерференцией звуковых волн. В целом, чем больше высота экрана, тем ниже средний уровень звукового давления за ним. Экран высотой 2 м показывает меньшую эффективность снижения шума, тогда как для экранов высотой 4 м и 6 м уровень звукового давления заметно ниже. На отдельных частотах кривые могут пересекаться, что является нормальным следствием интерференции звуковых волн. Результаты расчёта снижения шума показывают, что для экранов высотой 2 м, 4 м и 6 м они составляют соответственно 19,42 дБ, 29,96 дБ и 34,56 дБ. С увеличением высоты экрана путь распространения звука через верхнюю кромку становится длиннее, а зона акустической тени за экраном расширяется, поэтому эффект снижения шума возрастает. Наилучший результат получен для экрана высотой 6 м, однако прирост эффективности при переходе от 4 м к 6 м меньше, чем при переходе от 2 м к 4 м.

Представленные на рисунке 5 зависимости показывают связь графиков потерь и звукового давления с собственными колебаниями стальной оболочки. В качестве дальнейшего развития исследований и практических рекомендаций для производителей имеет смысл рассмотреть вариант конструкции не внешней стальной оболочки, а внутреннего стального каркаса (как представлено на рисунке 6, что может резко снизить влияние каркаса на акустическое поле.

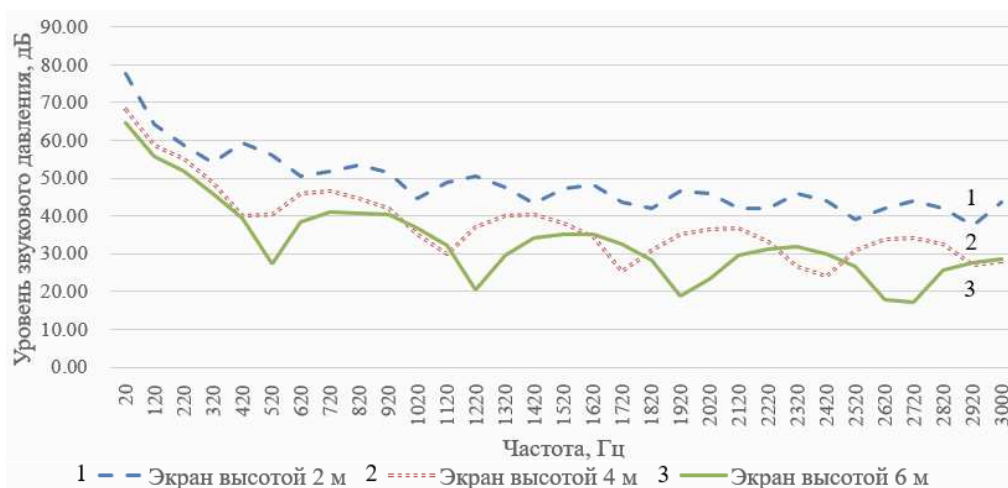


Рис. 5. Средний уровень звукового давления на расстоянии 1 м за шумозащитным экраном

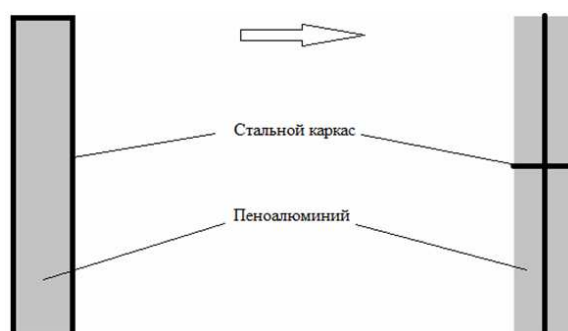


Рис. 6. Схема предлагаемой оптимизации конструкции пеноалюминиево-стальных композитных шумозащитных экранов

Заключение

Результаты показали, что собственный вес оказывает небольшое влияние на конструкцию шумозащитных экранов, а перемещения при этом имеют главным образом вертикальный характер. При ветровой нагрузке и сейсмическом воздействии отклик конструкции определяется в основном поперечными перемещениями. С увеличением высоты экрана максимальные перемещения и напряжения заметно возрастают. При ветровом давлении 0,8кПа максимальное напряжение увеличивается с 8,86 МПа для экрана высотой 2 м до 69,04 МПа для экрана высотой 6 м. При сейсмическом воздействии 0,2g для экрана высотой 6 м максимальное перемещение и максимальное напряжение составляют соответственно 15,87 мм и 72,66 МПа. Акустический расчёт показал, что при увеличении высоты экрана средний уровень звукового давления в области за ним снижается. Вносимые потери для экранов высотой 2 м, 4 м и 6 м составляют соответственно 19,42 дБ, 29,96 дБ и 34,56 дБ. Наилучший результат получен для экрана высотой 6 м. Однако прирост эффективности при переходе от 4 м к 6 м меньше, чем при переходе от 2 м к 4 м. В целом увеличение высоты шумозащитного экрана улучшает его акустическую эффективность, но одновременно приводит к росту структурного отклика при ветровой и сейсмической нагрузках. Поэтому при проектировании необходимо учитывать, как акустические характеристики, так и прочность конструкции.

Список литературы

1. Dhif R., Makni A., Taktak M., Shaabane M., Khaddar M. Investigation of the influence of variations in acoustic cladding and geometric discontinuities on the acoustic characteristics of lined channels // Archives of Acoustics. 2020, vol. 45, no. 1, pp. 49-66. DOI: 10.24425/aoa.2020.132481.
2. Кондратьев С.А., Иванов Н.И., Тюрина Н.В., Шашурин А.Е. Расчёт эффективности акустических экранов, установленных в помещении // Защита от шума и вибрации: сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 1-3 октября 2025 г. – СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 246-252.

3. Chen Liang, Song Li. A study on the integration of sound barrier design and urban planning of urban rail transport. // Urban railway transport research. 2023, vol. 26(1), pp. 103-107.
4. Шашурин А.Е., Борцова С.С. Экономическая целесообразность выбора шумозащитных конструкций // Вестник образования и науки развития Российской академии естественных наук. – 2020. – № 3. – С. 66-71. – DOI: 10.26163/RAEN.2020.91.82.009.
5. Син Ш., Туркина Н.Р., Го М. Разработка микроперфорированной звукопоглощающей панели с оптимизированной структурой воздушных зазоров // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №4(136). – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2026/11035>.
6. Zhang Xueyong, Wei Dingyuan, Dai Mengchao, Ma Tianwei, Zhang Xueqing, Zhou Yukun. Calculation of acoustic parameters of aluminum foam and its application // Noise and Vibration Control. 2024, no. 6, pp. 254-260.
7. Туркина Н.Р., Го М., Син Ш. Моделирование шумоизоляционных экранов транспортных магистралей // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием. – Пенза: Пензен. гос. аграр. ун-т, 2025. – С. 302-306.
8. Син Ш., Туркина Н.Р., Го М. Моделирование интерферометрических шумозащитных экранов железнодорожного транспорта Китая // Инженерный вестник Дона. – 2025. – №12(132). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2025/10629.
9. Dhif R., Makni A., Taktak M., Chaabane M., Haddar M. Investigation of the effects of acoustic lining variations and geometric discontinuities on the acoustic characteristics of lined ducts // Archives of Acoustics. 2020, vol. 45, no. 1, pp. 49-66. DOI: 10.24425/aoa.2020.132481.
10. Calvo D.C., Thangawng A.L., Layman C.N., Casalini R., Othman S.F. Underwater sound transmission through arrays of disk cavities in a soft elastic medium // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015, vol. 138, pp. 2537-2547. DOI: 10.1121/1.4931446.

References

1. Dhif R., Makni A., Taktak M., Shaabane M., Khaddar M. Investigation of the influence of variations in acoustic cladding and geometric discontinuities on the acoustic characteristics of lined channels // Archives of Acoustics. 2020, vol. 45, no. 1, pp. 49-66. DOI: 10.24425/aoa.2020.132481.
2. Kondratiev S.A., Ivanov N.I., Tyurina N.V., Shashurin A.E. Calculation of the effectiveness of acoustic screens installed indoors // Protection from noise and vibration: proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, October 1-3, 2025. – SPb.: Publ. house of BSTU "VOENMEH" n.a. D.F. Ustinov, 2025. – P. 246-252.
3. Chen Liang, Song Li. A study on the integration of sound barrier design and urban planning of urban rail transport. // Urban railway transport research. 2023, vol. 26(1), pp. 103-107.
4. Shashurin A.E., Bortsova S.S. Economic feasibility of choosing noise-proof structures // Bulletin of Education and Science of Development of the Russian Academy of Natural Sciences. 2020, no. 3, pp. 66-71. DOI: 10.26163/RAEN.2020.91.82.009.
5. Sin Sh., Turkina N.R., Guo M. Development of a microperforated sound-absorbing panel with an optimized structure of air gaps // Engineering Bulletin of the Don. 2026, no. 4(136). – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2026/11035>.
6. Zhang Xueyong, Wei Dingyuan, Dai Mengchao, Ma Tianwei, Zhang Xueqing, Zhou Yukun. Calculation of acoustic parameters of aluminum foam and its application // Noise and Vibration Control. 2024, no. 6, pp. 254-260.
7. Turkina N.R., Guo. M., Sin Sh. Modeling of noise insulation screens of transport highways // Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students with International participation. – Penza: Penza State Agrarian University, 2025. – P. 302-306.
8. Sin Sh, Turkina N.R., Guo M. Modeling of interferometric noise shields of railway transport in China // Engineering Bulletin of the Don. 2025, no. 12(132). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2025/10629.
9. Dhif R., Makni A., Taktak M., Chaabane M., Haddar M. Investigation of the effects of acoustic lining variations and geometric discontinuities on the acoustic characteristics of lined ducts // Archives of Acoustics. 2020, vol. 45, no. 1, pp. 49-66. DOI: 10.24425/aoa.2020.132481.
10. Calvo D.C., Thangawng A.L., Layman C.N., Casalini R., Othman S.F. Underwater sound transmission through arrays of disk cavities in a soft elastic medium // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015, vol. 138, pp. 2537-2547. DOI: 10.1121/1.4931446.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Туркина Наталья Рудольфовна – кандидат технических наук, доцент	Turkina Natalya Rudolfovna – candidate of technical science, associate professor
Син Шибо – аспирант	Sin Shibo – postgraduate student
Го Минсюй – аспирант	Guo Mingxu – postgraduate student
turkina_nr@voenmeh.ru	

Получена 14.08.2026