

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

---

УДК 699.844:534.2

**А. И. АНТОНОВ**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.<sup>1</sup>; **А. В. ГРЕЧИШКИН**, канд. техн. наук, доц. кафедры городского строительства и архитектуры<sup>2</sup>; **В. И. ЛЕДЕНЕВ**, д-р техн. наук, проф. кафедры городского строительства и автомобильных дорог<sup>3</sup>, вед. науч. сотр.<sup>1</sup>; **И. В. МАТВЕЕВА**, канд. техн. наук, доц. кафедры городского строительства и автомобильных дорог<sup>3</sup>

## РАСЧЕТЫ ПРЯМОГО И ДИФРАГИРОВАННОГО ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПРОНИКНОВЕНИИ В НЕГО ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ОТКРЫТЫЙ ПРОЕМ

<sup>1</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН».  
Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21.

Тел.: (495) 482-40-16; эл. почта: niisf@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28.

Тел.: (412) 48-27-37; эл. почта: gsia@pguas.ru

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е.

Тел.: (4752) 63-09-20, (4752) 63-03-72; эл. почта: gsia\_d\_tambov@mail.ru

*Ключевые слова:* акустически связанные помещения, дифракция звука, дифракционное уравнение, расчеты звука в помещении, шумовой режим помещений, производственные здания.

---

*Рассматриваются методы расчета прямого звука, приходящего в помещение через открытый проем, и его дифракционной составляющей, образующейся в зонах акустической тени. Выполнено сравнение результатов расчетов, полученных энергетическим методом, представленным в действующем своде правил СП 254.1325800-2016, и методом, основанным на численном решении дифракционного уравнения Френеля-Кирхгофа. На основе результатов сравнения определены границы применения рассмотренных методов в зависимости от размеров открытых проемов и исследуемого частотного диапазона звука.*

---

В производственных зданиях имеется большое количество помещений, связанных между собой открытыми по технологическим требованиям проемами. При этом часто наблюдается ситуация, когда в одном из связанных между собой помещений находится мощный источник шума, а в другом размещается тихое производство. Звуковая энергия из шумного помещения проникает через проем в тихое помещение и существенно ухудшает в нем шумовую обстановку. Подобная ситуация рассмотрена, например, в статье [1]. Для улучшения шумовой обстановки требуется проведение шумозащитных мероприятий. При выборе мероприятий необходимо выполнять оценку их акустической эффективности, производя расчеты шумового режима в связанных проемом помещениях до и после применения мер шумозащиты [2–3]. Ниже рассмотрена методика таких расчетов для двух связанных открытым проемом помещений.

Через открытый проем из шумного помещения в тихое приходят энергия прямого звука и отраженная звуковая энергия. В результате в тихом помещении

образуются три вида энергии: энергия прямого звука, прошедшего непосредственно через проем, дифрагированная энергия, образующаяся от прошедшего через проем прямого звука, энергия, образующаяся после прихода через проем отраженного звука из шумного помещения. Проникновение через проем различных видов звуковой энергии приводит к формированию в тихом помещении сложного звукового поля, расчет энергетических характеристик которого имеет определенные трудности.

Формирование звукового поля в тихом помещении во многом определяется размером проема. Размеры проема существенным образом влияют на выбор методов расчета.

В случае больших открытых проемов расчет прямого звука и отраженной звуковой энергии может производиться как в едином пространстве связанных между собой помещений. Выбор расчетного метода в этом случае определяется условиями формирования и распространения в помещениях звуковой энергии и, в первую очередь, характером отражения звука от ограждений [4–5]. В зависимости от характера отражения при расчете шума в связанных помещениях могут использоваться: метод прослеживания лучей, реализующий зеркальный характер отражения звука, статистический энергетический метод, основанный на принципах диффузного отражения звука от ограждений, и комбинированные методы расчета, реализующие зеркально-диффузный характер отражения [2–3]. Как показывает практика, наиболее приемлемыми в данном случае являются методы, использующие зеркально-диффузную модель отражения звука [6–7]. Такая модель наиболее адекватно учитывает реальный характер отражения звука в производственных помещениях [6].

В случае малого по размерам проема шумовое поле в тихом помещении следует определять путем сложения результатов расчетов энергетических характеристик от двух источников шума, энергия которых проникает через проем, а именно, от прямого звука источника шума и от отраженного шума, падающего из шумного помещения на проем. При расчете проникающего через проем отраженного шума проем можно рассматривать как плоский источник звука и использовать для расчета методику, предложенную в [8].

При расчете прямого звука, проходящего через проем от источника шума, необходимо также производить расчет и дифрагированной составляющей прямого звука. Такие расчеты имеют свои особенности. Особенности этих расчетов рассмотрены ниже на примере двух связанных открытым проемом помещений. Для расчета проникающего через проем прямого звука и дифрагированной энергии в настоящее время могут использоваться два подхода.

В первом случае используются принципы расчета, изложенные в СП 254.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума». Прямой звук, проникающий через проем, рассчитывается по выражению, которое в случае точечного источника шума имеет вид:

$$L_{\text{пр}} = L_w + 10 \lg(\Phi / \Omega r^2), \quad (1)$$

где  $L_w$  – звуковая мощность источника;  $\Phi$  – фактор направленности источника;  $\Omega$  – пространственный угол излучения звуковой энергии источником;  $r$  – расстояние между источником и расчетной точкой.

Дифрагированный звук, который образуется в пределах звуковой тени помещения, определяется при этом по методу Маекавы [9]. Так как графики для

определения величины дифрагированного звука по методу Маекавы получены для бесконечно протяженного экрана, использование их для расчета при проеме с ограниченными размерами может приводить к погрешностям.

Во втором случае определение прямого и дифрагированного звука производится на основе численного решения уравнения дифракции [10]. Такой подход в силу того, что реализуются волновые свойства звука, позволяет получить более точные результаты. При выполнении расчетов учитываются соотношения длин волн с размерами и формой проема.

Расчет в этом случае производится с использованием дифракционной формулы Френеля-Кирхгофа [9]:

$$P_M = \frac{\hat{P}}{2\lambda} \int_S \frac{\sin(\omega t - (r_T + r_M)k + \varphi)}{r_T + r_M} (\cos \theta_T + \cos \theta_M) dS, \quad (2)$$

где  $\hat{P}$  – максимальное мгновенное звуковое давление (амплитуда) на расстоянии единицы длины от источника  $T$ ;  $\lambda$  – длина звуковой волны;  $S$  – площадь фронта звуковой волны;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $f$  – частота звука;  $k = \omega/c$  – волновое число;  $c$  – скорость звука в воздухе;  $t$  – время;  $r_T$ ,  $r_M$  – расстояния от участка фронта волны  $ds$  до источника звука  $T$  и расчетной точки  $M$ ;  $\theta_T$ ,  $\theta_M$  – углы между нормалью к элементу поверхности  $ds$  и направлениями на точки  $T$  и  $M$ ;  $\varphi$  – начальная фаза звукового колебания.

Обозначения к формуле (2) приведены на рис. 1.

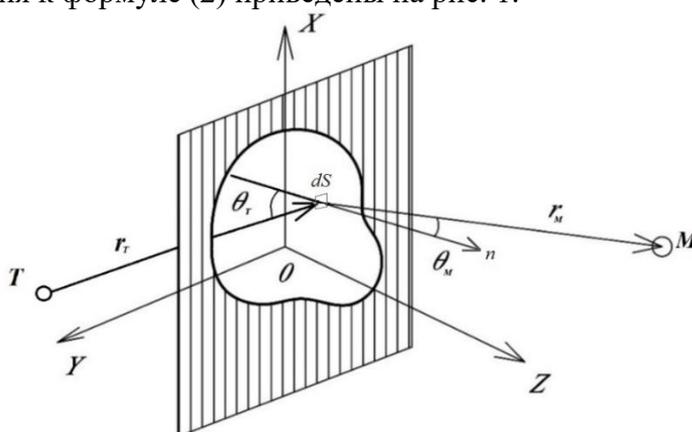


Рис. 1. Схема к расчету излучения шума элементом источника

В статье [10] показано, что уравнение дифракции может использоваться для расчетов прямого и дифрагированного звука при прохождении звуковой энергии через проемы и отверстия с различными размерами и формами. Для численного решения интеграла (2) разработана компьютерная программа. Программа была использована нами при оценке влияния зазоров между экраном и опорной плоскостью на акустическую эффективность экранирования шума [11].

Ниже приведено сравнение результатов расчетов прямого и дифрагированного звука в тихом помещении, полученных двумя рассмотренными выше методами. Схема шумного и тихого помещений, связанных через открытый проем, приведена на рис. 2.

Связанные помещения имеют размеры в плане, указанные на схеме (рис. 2). Высота помещений 3,0 м. Размер открытого проема 1,0×2,5 (h) м. Уровни звуковой мощности на всех исследованных частотах с целью наглядного сравнения результатов расчетов приняты равными  $L_w = 104$  дБ.

Далее приведены результаты расчета и анализа прямого и дифрагированного звука, образующегося в тихом помещении при проникновении прямого звука из помещения с источником.

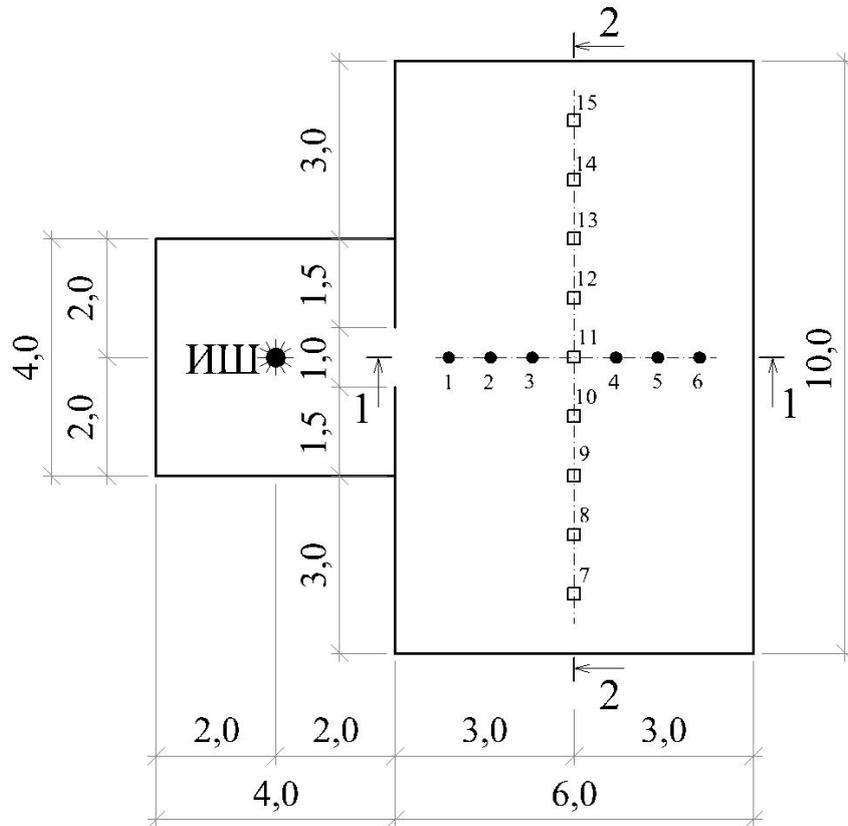


Рис. 2. Схема помещений к расчету прямого и дифрагированного звука с указанием положения расчетных точек и источника звука. Размеры на схеме даны в метрах

На рис. 1 и 2 цв. вклейки приведены карты прямого звука и его дифрагированной составляющей, определенные двумя методами. На рис. 1в и 2в цв. вклейки показаны различия в уровнях звукового давления, полученных разными методами. Розовый цвет на картах (рис. 1в и 2в цв. вклейки) указывает на превышение расчетных уровней, полученных на основе уравнения дифракции, по сравнению с методом, приведенным в СП 254.1325800.2016. Зеленый цвет, наоборот, свидетельствует о превышении уровней, полученных нормативным методом, по сравнению с расчетом по уравнению (2).

Результаты расчетов прямого звука двумя методами для сечения 1-1 (рис. 2) приведены на рис. 3.

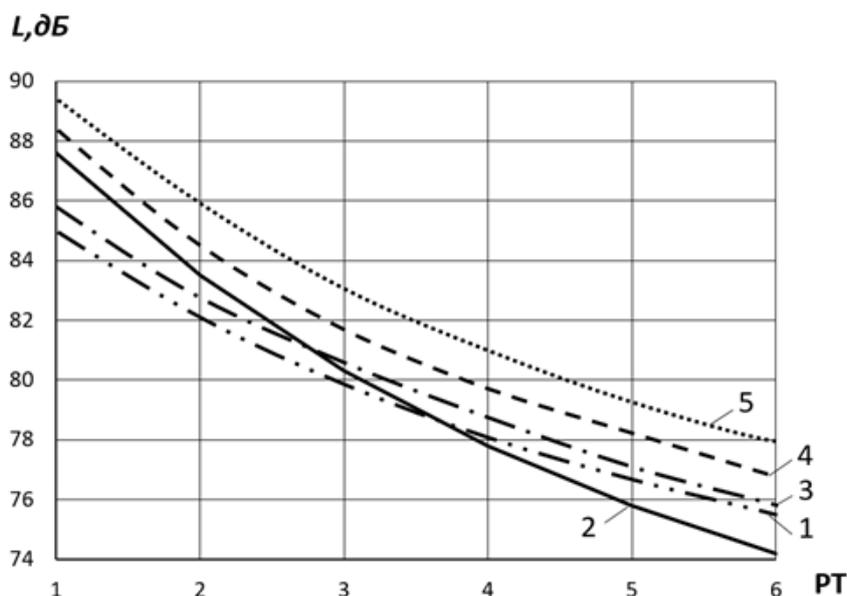


Рис. 3. Результаты расчета прямого звука, проникающего в тихое помещение через проем для сечения 1-1 на рис. 2: 1 – расчет энергетическим методом по формуле (1); 2–5 – расчеты с использованием уравнения (2), соответственно, на частотах 125, 500, 2000 и 8000 Гц

Анализ результатов расчета прямого звука, проходящего в тихое помещение через проем, показал следующее.

Согласно формуле (1), уровень прямого звука, проникающего в помещение, вне зависимости от частоты спадает на 6 дБ при удвоении расстояния от источника до расчетной точки (линия 1 на рис. 2).

В случае использования при расчетах дифракционного уравнения (2) распределение прямого звука имеет более сложный вид. Вдоль линии, проходящей через источник и геометрический центр проема по сечению 1-1 на высоких частотах формы графиков, рассчитанных по формуле (1) и уравнению (2), совпадают. При этом спад на всех частотах, кроме частоты 125 Гц, также составляет 6 дБ на удвоение расстояния.

Из графиков видно, что результаты расчета прямого звука на основе дифракционного уравнения выше значений, полученных по формуле (1), на 2–4 дБ. Следует отметить, что такое расхождение результатов характерно только для сечения 1-1 (точка 11 на рис. 4 и 5). На границах зоны прямого звука (точки 10 и 12 на рис. 4 и 5) расчеты по формуле (1) и дифракционному уравнению совпадают.

Наибольшие расхождения в расчете прямого звука различными методами наблюдаются на частоте 125 Гц, когда длина звуковой волны (2,72 м) превышает линейные размеры проема. В этом случае проем следует рассматривать как локальный источник звука (рис. 1б цв. вклейки) для частоты 125 Гц. Для расчета шума от такого источника возможно использовать энергетический метод расчета шума от плоского источника конечных размеров [8]. Недостатком в этом случае является необходимость использования разных методов для расчета прямого звука на разных частотах в зависимости от соотношения размеров проема и

длины волны. Поэтому на низких частотах, когда длины волн больше размеров проема, расчет прямого звука следует выполнять на основе уравнения дифракции.

Большее расхождение наблюдается в результатах расчетов дифрагированной составляющей звука. Качественное различие дифрагированного звука, рассчитанного по различным методикам, хорошо видно на картах (рис. 1 и 2 цв. вклейки). Расчет дифрагированного звука по методу Маекава основан на аналитическом решении дифракционного интеграла. Однако, как указано в [9], результат расчета содержит определенную степень усреднения с некоторыми при этом упрощениями. По этой причине карта распределения дифрагированного звука представляется плавной картиной без особенностей, характерных для волновых процессов. С волновых позиций пространственное распределение звука от проема, через который проходят сферические или почти «плоские» волны источника, можно представить в виде распределения интенсивности звука от плоского излучающего поршня, вставленного в плоский экран [12]. На картах (рис. 1б и 2б цв. вклейки) видно, что центральный луч, проходящий от источника звука через центр проема, окружен дифракционными кольцами. По мере смещения луча от центральной линии нарастает неравномерность звука, соответствующая картине дифракции Фраунхофера от прямоугольного отверстия [13]. Это особенно наглядно проявляется на частотах 2000 и 8000 Гц. Периодичность изменения уровней зависит от длины звуковой волны, размеров и формы проема.

Для количественной оценки дифрагированного звука на рис. 4 и 5 приведены графики изменения уровней звукового давления по сечению 2-2, проходящему через расчетные точки 7–15 (рис. 2). Сечение 2-2 располагается перпендикулярно центральному лучу, захватывает зону прямого звука и зоны акустической тени, куда попадает дифрагированный звук. Деление зон на прямой и дифрагированный звук при расчетах с использованием дифракционного уравнения является условным.

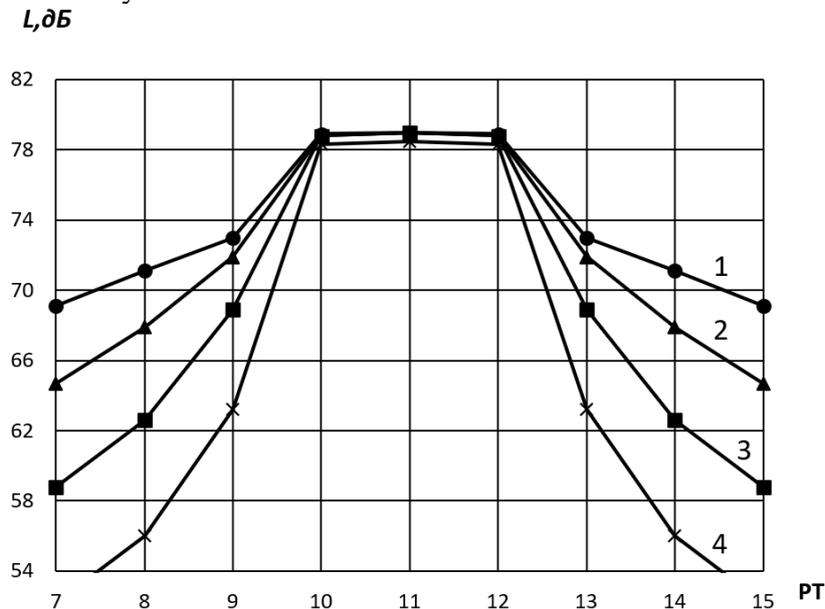


Рис. 4. Результаты расчета уровня звукового давления прямого и дифрагированного звука по сечению 2-2 по методу СП 254.1325800.2016 на частотах: 1 – 125 Гц; 2 – 500 Гц; 3 – 2000 Гц; 4 – 8000 Гц

**К СТАТЬЕ А. И. АНТОНОВА, А. В. ГРЕЧИШКИНА, В. И. ЛЕДЕНЕВА,  
И. В. МАТВЕЕВОЙ «РАСЧЕТЫ ПРЯМОГО И ДИФРАГИРОВАННОГО ЗВУКА  
В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПРОНИКНОВЕНИИ В НЕГО ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ  
ЧЕРЕЗ ОТКРЫТЫЙ ПРОЕМ»**

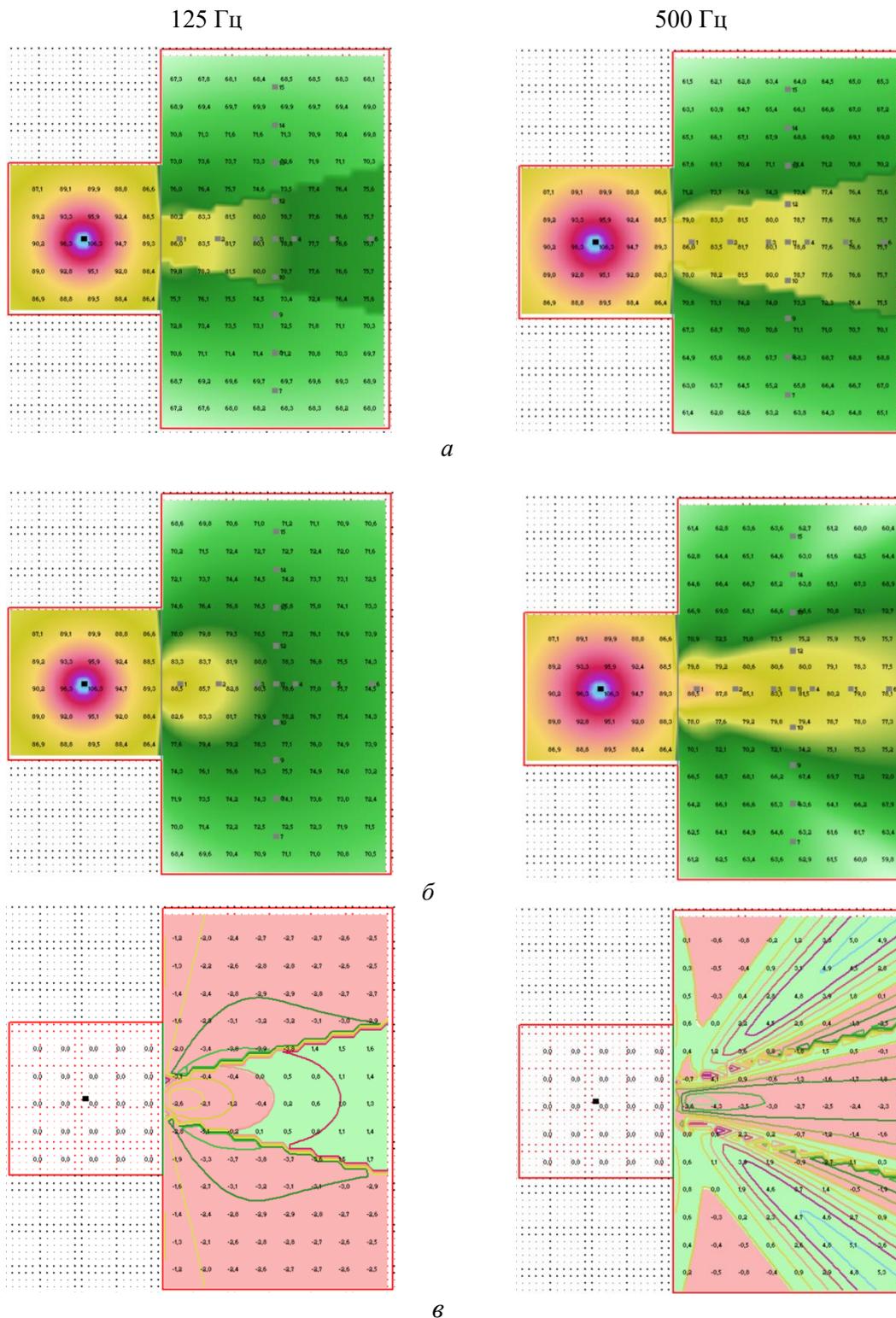


Рис. 1. Карты прямого и дифрагированного звука на частотах 125 и 500 Гц, рассчитанные: *a* – по методу СП 254.1325800.2016; *б* – по уравнению дифракции (2); *в* – различия в расчетных данных

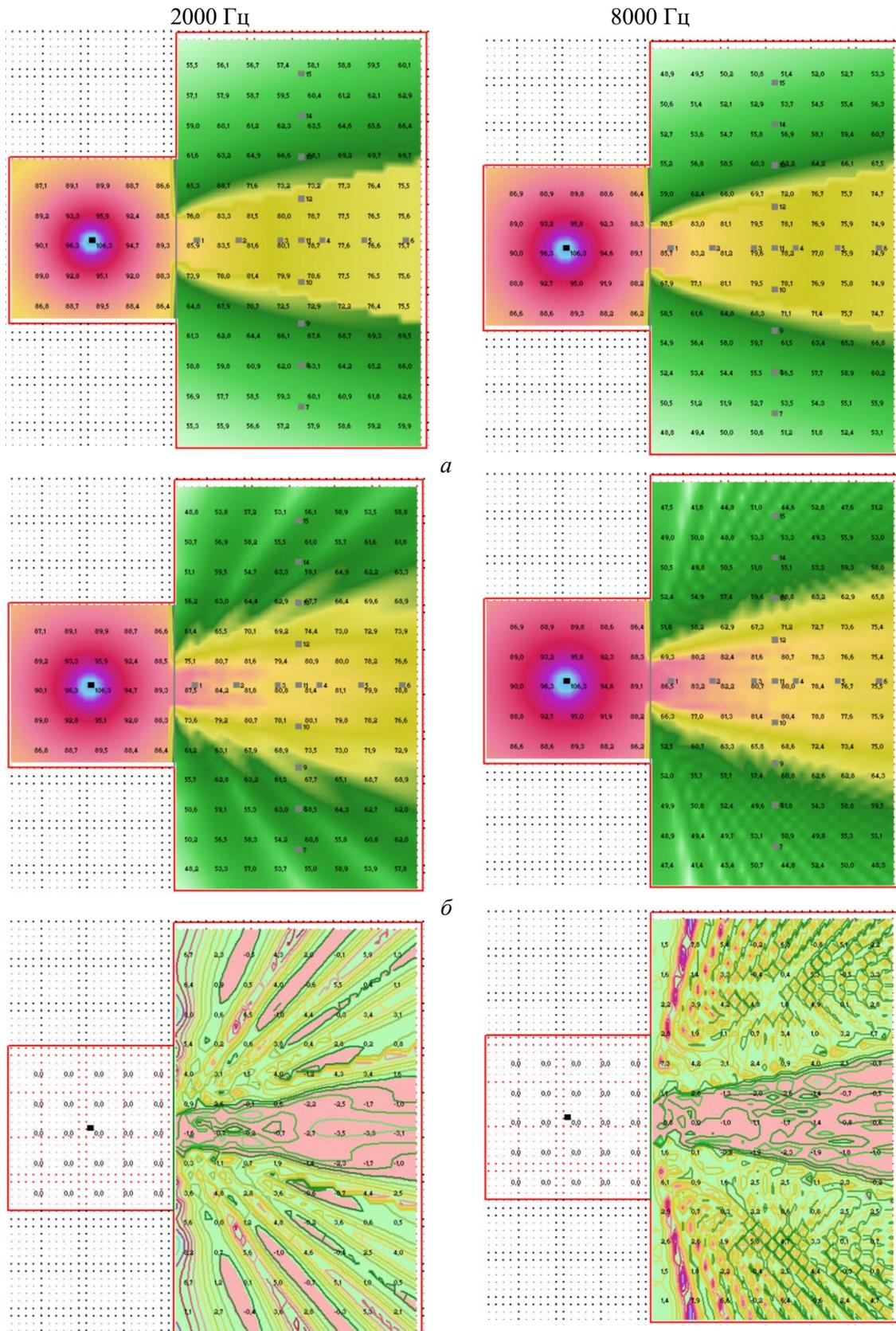


Рис. 2. Карты прямого и дифрагированного звука на частотах 2000 и 8000 Гц, рассчитанные: а – по методу СП 254.1325800.2016; б – по уравнению дифракции (2); в – различия в расчетных данных

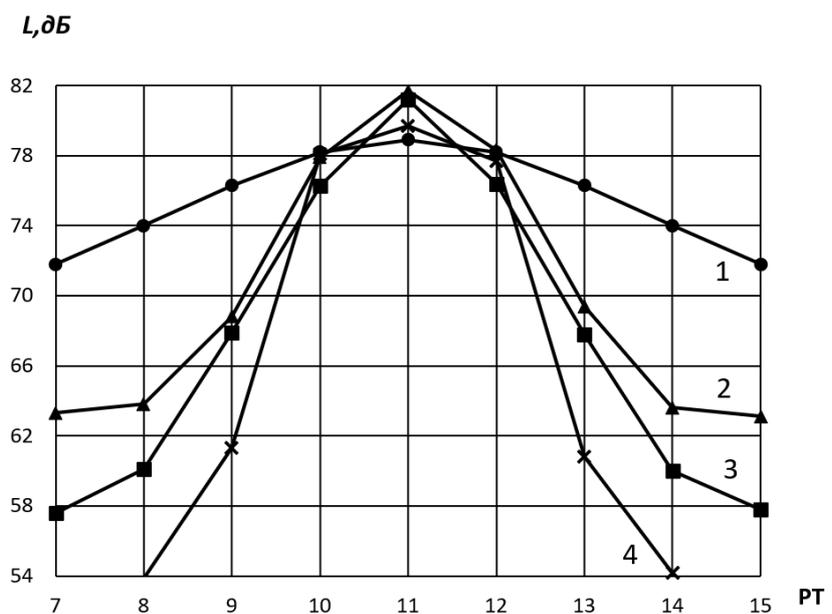


Рис. 5. Результаты расчета уровня звукового давления прямого и дифрагированного звука по сечению 2-2 на основе дифракционного уравнения (2). Условные обозначения даны на рис. 4

Сравнение результатов расчетов показывают, что, в основном, наблюдается совпадение уровней дифрагированного звука, рассчитанного по методу Маекавы и по уравнению (2). Имеющиеся различия в расчетах показаны на картах (рис. 1в и 2в цв. вклейки). На картах зеленым цветом отмечены зоны помещения, где уровни, определенные по дифракционному уравнению, ниже уровней, полученных по методу Маекавы, а в зонах помещения с розовым цветом – наоборот. Чередование зон зеленого и розового цветов говорит о примерном балансе средней звуковой энергии в помещении, рассчитанной различными методами.

В глубине акустической тени (точки 7, 8, 13, 14), и особенно на частоте 8000 Гц расчет по методу Маекавы завышает уровни дифрагированного звука, а на частоте 125 Гц на значительной части помещения уровни звукового давления, рассчитанные по дифракционному уравнению, выше уровней, полученных по методу Маекавы (рис. 1в цв. вклейки). Следует отметить, что указанные погрешности расчета на фоне значительно более высокого отраженного звука в помещении не окажут существенного влияния на точность окончательного расчета звукового поля.

Результаты выполненного исследования формирования составляющих звукового поля в помещении за счет прохождения в него через открытый проем прямого звука указывают на необходимость расчетов не только прямого звука, но и его дифрагированной составляющей, образующейся в зоне акустической тени.

При размерах проема, связывающего шумное и тихое помещение, больших, чем длины волн в исследуемом частотном диапазоне, расчеты прямого звука и его дифрагированной составляющей с достаточной для практики точностью можно определять на основе энергетического метода, предложенного в СП 254.1325800.2016. В случае, когда длины волн больше размеров проема, расчеты следует производить путем численного решения дифракционного уравнения (2), в



котором учитываются волновые свойства звукового поля, образующегося в тихом помещении.

Окончательно в общем случае уровни звукового давления в расчетных точках тихого помещения определяются путем суммирования энергии прямого звука, прошедшего через проем, дифрагированной энергии, отраженной энергии, прошедшей через проем из шумного помещения, а также собственной отраженной энергии, образующейся внутри помещения при отражениях от ограждений указанных выше составляющих звуковой энергии, приходящей в помещении извне.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерное проектирование средств шумозащиты в зданиях с автоматизированными процессами / И. Л. Шубин, А. И. Антонов, В. И. Леденев, Н. П. Меркушева // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2020. – № 10 (1034). – С. 36–38.
2. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 274 с.
3. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва : Директмедиа Паблишинг, 2022. – 192 с.
4. Антонов, А. И. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А. И. Антонов, А. В. Бацунова, И. Л. Шубин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2015. – № 3 (35). – С. 89–96.
5. Влияние характера отражения звука от ограждений на выбор метода расчета воздушного шума в гражданских и промышленных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, О. О. Федорова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2017. – № 2 (42). – С. 16–23.
6. Giyasov, V. I. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound / V. I. Giyasov, V. I. Ledenyov, I. V. Matveeva // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 1 (77). – P. 13–22. – DOI 10.18720/MCE.77.2.
7. Численные методы расчета шума в несоразмерных помещениях гражданских зданий / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев [и др.]. – Текст : электронный // Жилищное строительство. – 2023. – № 6. – С. 18–22. – DOI 10.31659/0044-4472-2023-6-18-22.
8. Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин, В. П. Гусев // Жилищное строительство. – 2013. – № 6. – С. 13–15.
9. Маекава, З. Акустические экраны / З. Маекава // Снижение шума в зданиях и жилых районах / под редакцией Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. – Москва : Стройиздат, 1987. – С. 426–448.
10. Расчеты акустической эффективности шумозащитных экранов на основе численного решения уравнения дифракции звука / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев [и др.]. – Текст : электронный // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 10–15. – DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-10-15.
11. Оценка влияния зазоров между акустическими экранами и опорной поверхностью на эффективность экранирования шума / А. В. Гречишкин, А. И. Антонов, В. П. Гусев, О. А. Жоголева. – Текст : электронный // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 215–221. – DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_215.



12. Морз, Ф. Колебания и звук / Ф. Морз. – Ленинград : Гостехтеориздат, 1949. – 496 с.

13. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – Москва : Наука, 1973. – 720 с.

**ANTONOV Aleksandr Ivanovich, doctor of technical sciences, leading researcher<sup>1</sup>; GRECHISHKIN Aleksandr Viktorovich, candidate of technical sciences, holder of the chair of urban development and architecture<sup>2</sup>; LEDENEV Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of urban development and roads<sup>3</sup>, leading researcher<sup>1</sup>; MATVEEVA Irina Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of urban development and roads<sup>3</sup>**

### **CALCULATIONS OF DIRECT AND DIFFRACTED SOUND IN A ROOM WHEN SOUND ENERGY ENTERS IT THROUGH AN OPENING**

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Tel.: (495) 482-40-16; e-mail: niisf@mail.ru

<sup>2</sup>Penza State University of Architecture and Construction.

28, German Titov St., Penza, 440028, Russia.

Tel.: (8412) 48-27-37; e-mail: gsia@pguas.ru

<sup>3</sup>Tambov State Technical University.

112-E, Michurinskaya St., Tambov, 392032, Russia.

Tel.: (4752) 63-09-20, (4752) 63-03-72; e-mail: gsiad@mail.tambov.ru

*Key words:* acoustically connected rooms, sound diffraction, diffraction equation, indoor sound calculations, indoor noise regime, industrial buildings.

---

*Methods for calculating direct sound entering a room through an opening and its diffraction component formed in areas of acoustic shadow are considered. A comparison of the calculation results obtained by the energy method presented in the current set of rules SP 254.1325800-2016 and the method based on the numerical solution of the Fredholm-Kirchhoff diffraction equation is performed. Based on the comparison results, limits are determined for the application of these methods depending on the size of the openings and the studied frequency range of sound.*

---

### REFERENCES

1. Shubin I. L., Antonov A. I., Ledenev V. I., Merkusheva N. P. Kompyuternoe proektirovanie sredstv shumozashchity v zdaniyakh s avtomatizirovannymi protsessami [Computer-Aided Design of Noise Protection Means in Buildings with Automated Processes]. BST: Byulleten stroitelnoy tekhniki [Bulletin of Construction Equipment]. 2020, № 10 (1034), P. 36–38.

2. Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V., Shubin I. L. Raschety shuma pri proektirovanii shumozashchity v proizvodstvennykh zdaniyakh [Noise Calculations in the Design of Noise Protection in Industrial Buildings]. Moscow; Berlin. Direkt-Media. 2020, 274 p.

3. Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V., Shubin I. L. Raschety shuma v grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniyakh pri zerkalno-diffuznom otrazhenii zvuka ot ograzhdeniy [Noise Calculations in Civil and Industrial Buildings with Specular-Diffuse Sound Reflection from Enclosures]. Moscow, Direktmedia Publishing, 2022, 192 p.



4. Antonov A. I., Battsunova A. V., Shubin I. L. Usloviya, opredelyayushchie protsessy formirovaniya shumovogo rezhima v zamknutykh obemakh, i ikh uchet pri otsenke raspredeleniya zvukovoy energii v pomeshcheniyakh [Conditions Determining the Processes of Noise Regime Formation in Enclosed Volumes and Their Consideration in Assessing the Distribution of Sound Energy in Rooms]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitelny universitet, Nizhny Novgorod, 2015, № 3 (35), P. 89–96.

5. Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V., Fyodorova O. O. Vliyanie kharaktera otrazheniya zvuka ot ograzhdeniy na vybor metoda rascheta vozdušnogo shuma v grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniyakh [Influence of the Nature of Sound Reflection from Enclosures on the Choice of Airborne Noise Calculation Method in Civil and Industrial Buildings]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitelny universitet, Nizhny Novgorod, 2017, № 2 (42), P. 16–23.

6. Giyasov B. I., Ledenyov V. I., Matveeva I. V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, № 1 (77), P. 13–22. DOI 10.18720/MCE.77.2.

7. Antonov A. I., Gusev V. P., Ledenev V. I. [et al.] Chislennyye metody rascheta shuma v nesorazmernykh pomeshcheniyakh grazhdanskikh zdaniy [Numerical Methods for Noise Calculation in Non-Proportional Rooms of Civil Buildings]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]*. 2023, № 6, P. 18–22. DOI 10.31659/0044-4472-2023-6-18-22.

8. Antonov A. I., Ledenev V. I., Solomatin E. O., Gusev V. P. Metody rascheta urovney priamogo zvuka, izluchaemogo ploskimi istochnikami shuma v gorodskoy zastroyke [Methods for Calculating Levels of Direct Sound Radiated by Flat Noise Sources in Urban Development]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]*. 2013, № 6, P. 13–15.

9. Maekava Z. Akusticheskie ekrany [Acoustic Screens]. Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh [Noise Reduction in Buildings and Residential Areas]. Pod redaktsiyey G. L. Osipova, E. Ya. Yudina. Moscow, Stroyizdat, 1987, P. 426–448.

10. Antonov A. I., Gusev V. P., Ledenev V. I. [et al.] Raschety akusticheskoy effektivnosti shumozashchitnykh ekranov na osnove chislennogo resheniya uravneniya diffraktsii zvuka [Calculations of the Acoustic Efficiency of Noise Barriers Based on the Numerical Solution of the Sound Diffraction Equation]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]*. 2024, № 6, P. 10–15. DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-10-15.

11. Grechishkin A. V., Antonov A. I., Gusev V. P., Zhogoleva O. A. Otsenka vliyaniya zazorov mezhdru akusticheskimi ekranami i opornoй poverkhnostyu na effektivnost ekranirovaniya shuma [Assessment of the Influence of Gaps Between Acoustic Screens and the Supporting Surface on the Effectiveness of Noise Screening]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo [Regional Architecture and Construction]*. 2025, № 1 (62), P. 215–221. DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_215.

12. Morz F. Kolebaniya i zvuk [Vibrations and Sound]. Leningrad, Gostekhteorizdat, 1949, 496 p.

13. Born M., Volf E. Osnovy optiki [Principles of Optics]. Moscow, Nauka, 1973. 720 p.

© А. И. Антонов, А. В. Гречишкин, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, 2025

Получено: 04.06.2025 г.