

УДК 628.517.2

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ С ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЗВУКА

<sup>1</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: gsiad\_tambov@mail.ru.

<sup>2</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21. Тел.: (495) 482-40-16

*Ключевые слова:* импульсный шум, время реверберации, расчетная модель шума, интегральное уравнение Куттруфа, производственные помещения.

---

*Рассматриваются принципы моделирования реверберационных процессов в производственных помещениях при работе в них импульсных источников звуковой энергии. Предложена методика оценки стандартного времени реверберации и коэффициентов потерь звуковой энергии в помещениях с использованием интегрального уравнения Куттруфа. Показано, что методика и разработанная компьютерная программа для ее реализации могут быть использованы при оценке точности и границ применимости ранее разработанных методов расчета пространственно-временных характеристик импульсного шума в производственных помещениях.*

---

В настоящее время на промышленных предприятиях широкое распространение имеет производственное оборудование и инструменты, излучающие в процессе работы импульсный шум. В результате этого в производственных помещениях образуется непостоянный во времени шумовой режим, оказывающий наиболее негативное воздействие на организм человека [1]. Для разработки мероприятий по снижению импульсного шума необходимо иметь сведения об акустических процессах формирования такого режима и на этой основе получать данные о пространственном распределении уровней импульсного шума по объему помещений в определенные моменты времени наблюдения [2].

Одним из процессов, определяющих шумовой режим в помещениях с импульсными источниками звука, является реверберация – постепенное затухание отраженной энергии после окончания излучения источником импульса звуковой энергии. Сведения о затухании звуковой энергии в промежутках времени между импульсами имеют важное значение при гигиенической оценке импульсного шума [1]. В этом случае необходимо, например, иметь данные о разности максимального и минимального уровней (глубину модуляции), о ее зависимости от частоты следований импульсов, о наличии фонового шума и о других пространственно-временных характеристиках импульсного шума [2, 3, 4].

Процесс реверберации в помещениях характеризуется его временем. Время реверберации определяет скорость затухания отраженной звуковой энергии в про-

межутках между излученными импульсами. Величина скорости затухания в помещениях зависит от их объемно-планировочных параметров, звукопоглощающих характеристик ограждений и от коэффициентов потерь звуковой энергии в них. На величину изменений энергии в промежутках между импульсами влияет также характер отражения звука от ограждений [5].

Кроме сведений о скорости затухания звуковой энергии, время реверберации позволяет оценивать влияние звукопоглощающих характеристик помещений на величину потерь звуковой энергии в них и тем самым определять акустическую эффективность применения звукопоглощающих облицовок для снижения шума в помещениях с импульсными источниками звука.

По указанным выше причинам расчет времени реверберации является важной задачей при прогнозировании шумового режима в помещениях с импульсными источниками звука и разработке мероприятий по его улучшению.

Временные параметры затухания можно определять, используя стандартное время реверберации  $T$ , в течение которого звуковая энергия в помещении после прекращения работы источника звука уменьшается в  $10^6$  раз, то есть

$$\frac{E(t)}{E_0} = e^{-\eta t} = 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – энергия в момент прекращения работы источника;  $E(t)$  – энергия в наблюдаемый момент времени  $t$ ;  $\eta$  – коэффициент потерь звуковой энергии в помещении.

Исходя из условия (1), выражение для определения коэффициента потерь имеет вид

$$\eta = \frac{6}{\lg e \cdot T}. \quad (2)$$

Коэффициент потерь можно также записать в виде

$$\eta = c \cdot m_3, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость звука в воздухе;  $m_3$  – эквивалентный пространственный коэффициент затухания звуковой энергии в объеме помещения [6].

Коэффициент  $m_3$  характеризует потери звуковой энергии в помещении на ограждениях и в его среде. В общем случае выражение для определения  $m_3$  при диффузном отражении звука от ограждений согласно [6] имеет вид

$$m_3 = m_b + m_{об} - \frac{\ln(1 - \xi_0)}{\bar{l}} - \frac{\sum_{i=1}^K S_i \ln(1 - \alpha_i)}{S\bar{l}}, \quad (4)$$

где  $m_b$  – коэффициент затухания звуковой энергии в воздухе;  $m_{об}$  – коэффициент затухания звуковой энергии на оборудовании и предметах, размещаемых в помещении, определяемый при их равномерном распределении в объеме по формуле

$$m_{об} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{обi} \ln(1 - \alpha_{обi})}{S\bar{l}}, \quad (5)$$

где  $S_{обi}$ ,  $\alpha_{обi}$  – площадь и коэффициент звукопоглощения  $i$ -го предмета;  $\bar{l}$  – средняя длина пробега лучей в помещении;  $\xi_0 = S_0 / S$  – вероятность падения лучей на полностью поглощающую поверхность  $S_0$  ограждений помещения (открытые проемы);  $S_i$ ,  $\alpha_i$  – площадь и коэффициент звукопоглощения  $i$ -й поверхности ограждения помещения;  $S$  – общая площадь ограждений помещения.

Как видно, первый и второй члены формулы (4) учитывают потери звуковой



энергии в среде помещения, третий член – потери энергии на открытых проемах, а четвертый – потери энергии за счет ее поглощения на ограждениях.

Следовательно, для того чтобы рассчитать время реверберации и оценить потери отраженной звуковой энергии, необходимо иметь методы его расчета, учитывающие перечисленные выше составляющие формулы (4).

В настоящее время имеются методы расчетов энергетических характеристик отраженных звуковых полей, на основе которых возможно моделировать реверберационные процессы в помещениях и, соответственно, определять время реверберации.

При расчетах времени реверберации в производственных помещениях используются методы, в основе которых лежат представления о диффузном характере отражения звука от ограждений. К ним относятся классический метод диффузного поля [7], статистические энергетические методы, основанные на представлениях о квазидиффузном звуковом поле [2, 8, 9], метод однородных дискретных цепей Маркова [10, 11, 12, 13], метод интегрального уравнения Куттруфа [14, 15]. Использование перечисленных методов при исследовании реверберационных процессов в помещениях имеет определенные ограничения [2, 8, 16].

Наиболее универсальным и наиболее приближенным к реальным реверберационным процессам, происходящим в помещениях при диффузном отражении звука от ограждений, является метод, основанный на интегральном уравнении Куттруфа [14]. Уравнение решается численным методом, позволяющим производить оценку времени реверберации в помещениях любой сложной формы, учитывая при этом конкретные звукопоглощающие характеристики ограждений, наличие в них открытых проемов, а также характер излучения звука импульсными источниками шума. Так как метод в полной мере учитывает перечисленные выше характеристики, он может использоваться не только при непосредственном определении времени реверберации, но и при оценке точности и границ применимости других приближенных методов расчетов.

Ниже приведена методика расчетов времени реверберации с использованием уравнения Куттруфа применительно к условиям шумового режима в производственных помещениях с импульсными источниками звука. Предлагается следующий алгоритм расчета времени реверберации и определения коэффициентов потерь звуковой энергии в помещениях.

1. Все поверхности помещения делятся на площадки  $d_s$  (см. рис. 1). Размеры площадок принимаются такими, чтобы распределение плотности звуковой энергии в их пределах было достаточно равномерным. Коэффициенты поглощения и отражения звуковой энергии поверхностями при этом должны быть диффузными, а отражение звуковой энергии от поверхностей определяется косинусной зависимостью по закону Ламберта.

2. Устанавливаются дискретные промежутки времени, при которых производятся исследования процессов реверберации после отключения источника звука. Разбиение на отдельные временные участки зависит от требуемой точности расчета, возможностей вычислительной техники, объемно-планировочных и акустических характеристик помещения и ряда других факторов.

3. С использованием выражения (6) находится интенсивность прямой энергии  $I_{ds't}^0$ , падающей на каждую элементарную площадку поверхности  $ds'$  в момент времени до отключения источника звука.

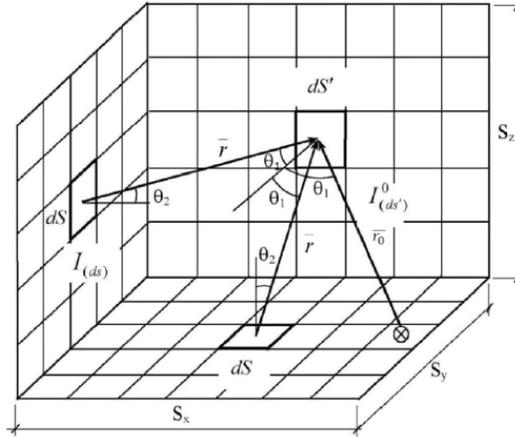


Рис. 1. Схема к расчету времени реверберации с использованием уравнения Куттруфа

$$I_{ds't}^0 = \frac{W(1 - \alpha_{s'})}{4\pi r_0^2} \exp(-m_b r_0), \quad (6)$$

где  $W$  – звуковая мощность точечного импульсного источника звука с равномерным излучением звуковой энергии в сферу;  $\alpha_{s'}$  – коэффициент звукопоглощения поверхности на площадке  $ds'$ ;  $r_0$  – расстояние от источника импульсного звука до площадки  $ds'$ .

4. Вычисляются интенсивности  $I_{ds'}$ , падающие на участки  $ds'$ , определяемые вкладами от всех других участков ограждений на момент отключения источника звука.

5. По выражению (7) вычисляется интенсивность  $I_{ds'}$ , образуемая на участке  $ds'$  от всех интенсивностей  $I_{ds}$ , падающих на площадку  $ds'$  с других площадок  $ds$  на момент отключения источника звука.

$$I_{ds'} = \int_s I_{ds} (1 - \alpha_s) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} ds + I_{ds'}^0 \cos \theta_0, \quad (7)$$

где  $I_{ds}(1 - \alpha_s)$  – интенсивность падающей на элемент  $ds'$  отраженной звуковой энергии, определяемой вкладами отраженной от всех других элементов ограждений  $ds$ ;  $I_{ds'}^0$  – интенсивность отраженной звуковой энергии, образуемой при падении прямого звука на элемент  $ds'$ ;  $r$  – расстояние между элементами  $ds$  и  $ds'$ ;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы между вектором  $\vec{r}$  и нормальными к элементам  $ds$  и  $ds'$ ;  $\alpha_s$  – коэффициент звукопоглощения поверхности  $ds$ ;  $\theta_0$  – угол между вектором  $\vec{r}$  и нормалью к элементу  $ds'$ .

6. По выражению (8) вычисляется плотность диффузно отраженной энергии в расчетной точке помещения на момент отключения источника звука

$$\varepsilon_i^\partial = \int_s \frac{I_{ds'} (1 - \alpha_{s'}) \cos \theta}{\pi r_{s'i}^2 c} \exp(-m_b r_{s'i}), \quad (8)$$

где  $I_{ds'}(1 - \alpha_{s'})$  – интенсивность диффузно отраженной энергии, излучаемой в  $i$ -ю расчетную точку от поверхности  $ds'$ ;  $r_{s'i}^2$  – расстояние от поверхности  $ds'$  до  $i$ -й расчетной точки;  $\alpha_{s'}$  – коэффициент звукопоглощения поверхности  $ds'$ ;  $\theta$  – угол направления от площадки  $ds'$  на  $i$ -ю расчетную точку.

7. По выражению (9) вычисляется интенсивность диффузной звуковой энергии  $I_{(ds',\tau)}$ , образуемой в момент времени  $\tau$  после отключения источника звука



$$I_{(ds',\tau)} = \frac{I_{(ds,\tau-r/c)}(1-\alpha_s)\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi r^2} ds, \quad (9)$$

где  $I_{(ds',\tau-r/c)}$  – интенсивности падающей на участок  $ds'$  звуковой энергии, определяемые вкладами отражений рассеянной энергии от всех других участков ограждений  $ds$  с учетом времени прихода их в расчетную точку. Остальные обозначения в (9) те же, что и в (7).

8. По выражению (10) вычисляется плотность диффузно отраженной энергии в  $i$ -й расчетной точке в каждый конкретный момент времени  $\tau$

$$\varepsilon_{\tau i}^{\delta} = \int_s \frac{I_{(ds',\tau-r_s'/c)}(1-\alpha_{s'})\cos\theta ds}{\pi r_s'^2 c} \exp(-m_{\text{в}} r_s' i), \quad (10)$$

где  $I_{(ds',\tau-r_s'/c)}(1-\alpha_{s'})$  – интенсивность рассеянной звуковой энергии, излучаемой в расчетную точку помещения от поверхности  $ds'$  с учетом времени излучения звуковой энергии и прихода ее в расчетную точку;  $r_s'$  – расстояние от поверхности  $ds'$  до расчетной точки;  $\tau$  – расчетное время наблюдения;  $\theta$  – угол направления от площадки  $ds'$  на  $i$ -ю расчетную точку.

9. При известных значениях плотности отраженной энергии  $\varepsilon_{\tau i}^{\delta}$  определяют уровни звукового давления в  $i$ -й расчетной точке в каждый расчетный момент времени  $\tau$  и затем производится определение стандартного времени реверберации  $T$ .

10. По полученному времени реверберации  $T$  по формуле (2) производится вычисление коэффициента потерь звуковой энергии в исследуемом помещении.

11. По известной величине коэффициента потерь звуковой энергии  $\eta$ , используя выражения (3) и (4), возможно определять величину среднего коэффициента звукопоглощения  $\bar{\alpha}$ . Формула для его определения в наиболее общем случае согласно [8] имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 1 - \exp(-m_3 \bar{l}) = \\ &= 1 - \exp \left[ \frac{S \ln(1 - \xi_0) + \sum_{i=1}^K \ln(1 - \alpha_i) + \sum_{i=1}^N S_{\text{об}i} \ln(1 - \alpha_{\text{об}i})}{S} - m_3 \bar{l} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее, изменяя составляющие формулы (11), возможно регулировать средний коэффициент звукопоглощения  $\bar{\alpha}$  и, соответственно, коэффициент потерь звуковой энергии в помещении и время реверберации в нем.

Как видно из представленной методики, реализация численным методом интегрального уравнения Куттруфа имеет значительную трудоемкость. Требуется многократное вычисление интегралов на всех ограждающих поверхностях помещений. Трудоемкость напрямую зависит от количества разбиений ограждений на элементарные площадки  $ds$  и от числа учитываемых актов отражений рассеянной энергии. Расчеты интенсивности и плотности отраженной звуковой энергии производятся через определенный интервал времени. Шаг по времени и, соответственно, число учитываемых интервалов зависит от скорости затухания отраженной звуковой энергии в каждом конкретном помещении. Следовательно, использование данной методики требует компьютерного обеспечения.

Для реализации рассмотренного алгоритма расчета разработана компьютерная программа. Программа дает возможность определять время реверберации, а также строить графики изменения уровней отраженной звуковой энергии во вре-



мени при работе в помещении импульсного источника звука.

Основным достоинством метода и реализующей его программы является возможность оценки на его основе точности расчетов другими более простыми, но приближенными методами. В частности, с использованием данного метода и программы произведено обоснование возможности применения для оценки пространственных и временных характеристик импульсного шума комбинированного метода расчета, в котором расчет распределения шума в пространстве помещения выполняется численным статистическим энергетическим методом, а оценка временных изменений шума в каждой расчетной точке методом диффузного звукового поля [2]. Показано, что комбинированный метод обеспечивает требуемую при инженерных расчетах точность при минимальных затратах времени на вычислительный процесс.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суворов, Г. А. Импульсный шум и его влияние на организм человека / Г. А. Суворов, А. М. Лихницкий. – Ленинград : Медицина, 1975. – 207 с. – Текст : непосредственный.
2. Методы оценки пространственно-временных изменений импульсного шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4 (60). – С. 9–16.
3. Исследование влияния характеристик источников импульсного шума на распределение звуковой энергии в помещениях / В. И. Леденев, О. А. Жоголева, М. А. Пороженко, В. А. Аистов. – Текст : непосредственный // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы VIII Международной научно-практической конференции / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2021. – С. 216–218.
4. Учет фонового шума при проектировании шумозащиты в помещениях с импульсными источниками звука / А. И. Антонов, В. И. Леденев, М. А. Пороженко, И. В. Матвеева. – Текст : непосредственный // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 11 (1047). – С. 23–28.
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. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2017. – № 2 (42). – С. 16–23.
6. Эквивалентные коэффициенты затухания звуковой энергии в помещениях и их использование при расчетах шума в производственных зданиях / В. И. Леденев, А. М. Макаров, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 1 (45). – С. 25–32.
7. Маньковский, В. С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения / В. С. Маньковский. – Москва : Искусство, 1966. – 37 с. – Текст : непосредственный.
8. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, В. И. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 274 с. – ISBN 978-5-4499-0616-8. – Текст : непосредственный.
9. Antonov A. I. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection / A. Antonov, V. Ledenev, I. Shubin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Published 1 March 2021. – Volume 1079, Chapter 3. – doi: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044.
10. Gerlach, R. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. – *Forschr. Akustik. Plenarvortrag und Kurzref. 3, Tag. Dtsch. Arbeitsgemeinsh. Akustik, DAGA-73.* – Aachen, 1973. – P. 427–430.



11. Gerlach, R. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale Überprüfung / R. Gerlach, V. Meliert // *Acustica*. – 1975. – V. 32, № 4. – P. 217–227.
12. Головкин, А. В. Методика оценки процесса реверберации в помещении на основе однородных дискретных цепей Маркова / А. В. Головкин, В. И. Леденев, А. А. Островская. – Текст : непосредственный // Устойчивое развитие региона : архитектура, строительство, транспорт : материалы VIII Международной научно-практической конференции / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2021. – С. 194–196.
13. Головкин, А. В. Использование однородных Марковских цепей при оценке распределения звуковой энергии в системах акустически связанных помещений / А. В. Головкин, А. А. Крюкова, А. А. Островская // Устойчивое развитие региона : архитектура, строительство, транспорт : материалы VII Международной научно-практической конференции / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2020. – С. 194–198.
14. Kuttruff, H. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform / H. Kuttruff, T. Strassen // *Acustica*. – 1980. – V. 45, № 4. – P. 246–255.
15. Kuttruff, H. Stationare Schallausbreitung in Flachräumen / H. Kuttruff // *Acustica*. – 1985. – V. 57, № 2. – P. 62–67.
16. Заборов, В. И. О пределах применимости расчета отраженного шума по статистической теории / В. И. Заборов, Н. А. Кочергин. – Текст : непосредственный // Доклады III Всесоюзной конференции по борьбе с шумом и вибрацией. Секция «Борьба с шумом». – Челябинск, 1980. – С. 319–322.

**ANTONOV Aleksandr Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of architecture and building construction<sup>1</sup>; leading researcher<sup>2</sup>; ZHOGOLEVA Olga Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of urban development and roads<sup>1</sup>, researcher<sup>2</sup>; LEDENYOV Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of urban development and roads<sup>1</sup>; leading researcher<sup>2</sup>; MATVEEVA Irina Vladimirovna<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of urban development and roads**

#### **MODELING REVERBERATION PROCESSES IN INDUSTRIAL PREMISES WITH PULSED SOUND SOURCES**

<sup>1</sup>Tambov State Technical University

112-E, Michurinskaya St., Tambov, 392032, Russia. Tel.: +7 (4752) 63-09-20, +7 (4752) 63-03-72; e-mail: gsiad@mail.tambov.ru

<sup>2</sup>Research Institute of Building Physics of RAASN,

21, Lokomotivny Dr., Moscow, 127238, Russia. Tel.: +7 (495) 482-40-16

*Key words:* pulse noise, reverberation time, noise calculation model, Kuttruff integral equation, industrial premises.

---

*The article considers principles of modeling reverberation processes in industrial premises when pulsed sources of sound energy work in them. A method for estimating the standard reverberation time and the coefficients of sound energy loss in rooms using the Kuttruff integral equation is proposed. It is shown that the methodology and the developed computer program for its implementation can be used to assess the accuracy and applicability limits of previously developed methods for calculating the spatiotemporal characteristics of pulse noise in industrial premises.*

---

#### REFERENCES

1. Suvorov G. A., Likhnitsky A. M. Impulsny shum i ego vliyanie na organizm cheloveka [Pulse noise and its effect on the human body]. – Leningrad: Meditsina, 1975. – 207 p.



2. Antonov A. I., Ledenyov V. I., Matveeva I. V., Solomatin E. O. Metody otsenki prostranstvenno-vremennykh izmeneniy impulsnogo shuma pri proektirovanii shumozaschity v proizvodstvennykh zdaniyakh [Methods for estimating spatiotemporal changes in pulse noise at designing noise protection in industrial buildings] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. – 2021. – № 4(60). – P. 9–16.
3. Ledenyov V. I., Zhogoleva O. A., Porozhenko M. A., Aistov V. A. Issledovanie vliyaniya kharakteristik istochnikov impulsnogo shuma na raspredelenie zvukovoy energii v pomescheniyakh [Investigation of the influence of the characteristics of pulse noise sources on the distribution of sound energy in premises] // *Ustoychivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitelstvo i transport. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference]*. Tambov. gos. tekhn. un-t. Tambov, 2021. – P. 216–218.
4. Antonov A. I., Ledenyov V. I., Porozhenko M. A., Matveeva I. V. Uchyot fonovogo shuma pri proektirovanii shumozaschity v pomescheniyakh s impulsnymi istochnikami zvuka [Consideration of background noise in the design of noise protection in rooms with pulsed sound sources] // *BST: Byulleten stroitelnoy tekhniki [BCE: Bulletin of Construction Equipment]*. – 2021. – № 11 (1047). – P. 23–28.
5. Antonov A. I., Ledenyov V. I., Matveeva I. V., Fyodorova O. O. Vliyanie kharaktera otrazheniya zvuka ot ograzhdeniya na vybor metoda raschyota vozdušnogo shuma v grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniyakh [Influence of the mode of sound reflection from walls on selection of the method of air noise calculation in civil and industrial buildings] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2017. – № 2(42). – P. 16–23.
6. Ledenyov V. I., Makarov A. M., Matveeva I. V., Solomatin E. O. Ekvivalentnye koeffitsienty zatukhaniya zvukovoy energii v pomescheniyakh i ikh ispolzovanie pri raschyotakh shuma v proizvodstvennykh zdaniyakh [Equivalent coefficients of sound energy attenuation in rooms and their use in calculations of noise in industrial buildings] // *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. – 2018. – № 1(45). – P. 25–32.
7. Mankovsky V. S. Akustika studiy i zalov dlya zvukovosproizvedeniya [Acoustics of studios and halls for sound reproduction] / Moscow: Iskusstvo. – 1966. – 37 p.
8. Antonov A. I., Ledenyov V. I., Matveeva V. I., Shubin I. L. Raschyoty shuma pri proektirovanii shumozaschity v proizvodstvennykh zdaniyakh [Noise calculations in the design of noise protection in industrial buildings] / Moscow; Berlin: Direkt-Media. – 2020. – 274 p. – ISBN 978-5-4499-0616-8.
9. Antonov A. I., Ledenyov V. I., Shubin I. L. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection / *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - Volume 1079, Chapter 3. – Published 1 March 2021. – doi: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044.
10. Gerlach R. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. – *Forsch. Akustik. Plenarvortr. und Kurzref.* 3, Tag. Deutsch. Arbeitsgemeinsh. Akustik, DAGA-73, Aachen, 1973. P. 427–430.
11. Gerlach R. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale Überprüfung / R. Gerlach, V. Meliert // *Acustica*, 1975. V. 32. № 4. P. 217–227.
12. Golovko A. V., Ledenyov V. I., Ostrovskaya A. A. Metodika otsenki protsessa reverberatsii v pomeschenii na osnove odnorodnykh diskretnykh tsepey Markova [Methodology for evaluating the reverberation process in a room based on homogeneous discrete Markov circuits] // *Ustoychivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitelstvo, transport. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference]*. Tambov. gos. tekhn. un-t. Tambov, 2021. – P. 194–196.
13. Golovko A. V., Kryukova A. A., Ostrovskaya A. A. Ispolzovanie odnorodnykh Markovskikh tsepey pri otsenke raspredeleniya zvukovoy energii v sistemakh akusticheskikh



svyazannykh pomescheniy [The use of homogeneous Markov circuits in assessing the distribution of sound energy in systems of acoustically connected rooms] // *Ustoychivoe razvitiye regiona: arkhitektura, stroitelstvo, transport. Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference]. Tambov. gos. tekhn. un-t. Tambov, 2020. – P. 194–198.

14. Kuttruff H., Strassen T. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform // *Acustica*. 1980. V. 45. № 4. P. 246–255.

15. Kuttruff H. Stationare Schallausbreitung in Flachräumen // *Acustica*, 1985. V. 57. № 2. P. 62–67.

16. Zaborov V. I., Kochergin N. A. O predelakh primenimosti raschyota otrazhyonnogo shuma po statisticheskoy teorii [On the limits of applicability of the reflected noise calculation according to statistical theory] // *Doklady III Vsesoyuznoy konferentsii po borbe s shumom i vibratsiyey. Sektsiya “Borba s shumom”* [Reports of the III All-Union Conference on Combating Noise and Vibration. The section “Fighting the Noise”]. – Chelyabinsk, 1980. – P. 319–322.

© А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, 2022

Получено: 20.06.2022 г.

УДК 699.844

**В. В. ДЫМЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. кафедры архитектуры;  
**Д. В. МОНИЧ**, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ЗВУКА ЧЕРЕЗ КАРКАСНО-ОБШИВНЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ С РАЦИОНАЛЬНЫМ КАРКАСОМ И РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ОБШИВОК

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57;  
эл. почта: megagrover@yandex.ru

*Ключевые слова:* каркасно-обшивная перегородка, характеристика самосогласования волновых полей, коэффициент резонансного прохождения звука, коэффициент инерционного прохождения звука.

---

*Представлено исследование влияния материала листовых обшивок на параметры резонансного и инерционного прохождения звука через каркасно-обшивные перегородки с сигма-образными стоечными профилями. Рассмотрены три материала листовых обшивок. Определены соотношения физико-механических параметров перегородок, позволяющие эффективно использовать резервы повышения звукоизоляции. Построены и проанализированы частотные характеристики коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука через перегородки с тремя материалами листовых обшивок.*

---

Из экспериментов различных исследователей известно, что материал обшивки перегородок оказывает существенное влияние на их звукоизоляцию в широком диапазоне частот [1, 2]. В работе [3] проведены исследования рационального сечения стоечных профилей звукоизолирующих каркасно-обшивных перегородок. Влияние данных элементов на прохождение звука через каркасно-обшивную перегородку можно условно разделить на две составляющие: 1) непосредственная передача звуковых колебаний от одной обшивки к другой (звуковой мостик);