

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 534.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-117-128

*А.И. АНТОНОВ<sup>1,2</sup>, В.И. ЛЕДЕНЕВ<sup>1,2</sup>,  
И.В. МАТВЕЕВА<sup>1</sup>, М.А. ПОРОЖЕНКО<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,*

*<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН*

## **РАСЧЕТ НЕПОСТОЯННОГО ШУМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ПОМЕЩЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

Шумы непостоянного действия оказывают негативное влияние на здоровье людей. Проектирование эффективных методов снижения шума определяется полнотой и точностью расчета его энергетических параметров. Актуальность исследования заключается в том, что существующая оценка непостоянного шума на основе эквивалентных уровней не отвечает современным требованиям, особенно при действии импульсных источников шума.

Цель работы – исследование возможности экспериментального определения функции отклика помещения и ее использования для оценки акустического режима помещений с непостоянными во времени источниками шума.

В работе предлагается выполнить подробный расчет параметров непостоянных звуковых полей на основе функции отклика помещения, которая представляет реакцию помещения на импульсное возбуждение. Функция может быть получена расчетом аналитическими или численными методами, а для сложных условий действующих производств – на основе экспериментальных измерений процессов затухания энергии при отключении источника постоянного шума.

В результате исследования предложена экспериментальная методика определения функции отклика и показаны возможности ее использования для оценки шумового режима в помещениях с непостоянными источниками шума.

Методика экспериментального определения функции отклика помещения на импульсное возбуждение дает возможность исследовать акустические процессы в помещениях со сложными условиями формирования шумового режима, для которых невозможно выполнить анализ аналитическими методами. Функция отклика, полученная экспериментально, позволяет целенаправленно решать задачи по изменению шумового режима в помещениях с источниками непостоянной звуковой мощности.

**Ключевые слова:** непостоянный шум; функция отклика помещения; метод расчета шума; строительно-акустические меры шумозащиты; производственные здания.

**Для цитирования:** Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Пороженко М.А. Расчет непостоянного шума с использованием функции отклика помещения, определяемой по экспериментальным данным // Вестник Томского гос-

ударственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 117–128.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-117-128

A.I. ANTONOV<sup>1,2</sup>, V.I. LEDENEV<sup>1,2</sup>,  
I.V. MATVEEVA<sup>1</sup>, M.A. POROZHENKO<sup>2</sup>,

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

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

## NONCONTINUOUS NOISE CALCULATED BY ROOM RESPONSE FUNCTION DETERMINED BY EXPERIMENTAL DATA

**Purpose:** Experimental determination of the response room function and its use to estimate the acoustic conditions in rooms with noncontinuous noise sources. **Methodology/approach:** The detailed parameter calculation of noncontinuous sound fields using the response room function, which is the room response to pulse excitation. The response function can be calculated by analytical or numerical methods and by experimental measurements in production conditions the energy attenuation when a constant noise source is switched off. **Findings:** Noncontinuous noise has a negative impact on health. The effective noise reduction is determined by the complete and accurate analysis of its energy parameters. The noncontinuous noise estimation based on equivalent levels does not meet the requirements, especially when pulsed noise sources are active. The experimental technique is proposed for the response function calculation and its use in evaluating the noise conditions in rooms with noncontinuous noise sources. **Practical implications:** The experimental determination of the response function to pulse excitation allows studying the acoustic processes in rooms for the formation of noise conditions when analytical methods cannot be used. The experimentally obtained response function makes it possible to solve problems of changing the noise conditions in rooms with noncontinuous noise sources.

**Keywords:** noncontinuous noise; response function; noise calculation method; acoustic noise protection; industrial buildings.

**For citation:** Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Porozhenko M.A. Raschet nepostoyannogo shuma s ispol'zovaniem funktsii otklika pomescheniya, opredelyaemoy po eksperimental'nym dannym [Noncontinuous noise calculated by room response function determined by experimental data]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 6. Pp. 117–128.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-117-128

### Введение

Шумовой режим большинства производственных помещений имеет непостоянный характер. Эти шумы, и особенно импульсные, оказывают негативное влияние на работоспособность и здоровье людей [1]. Для снижения неблагоприятного воздействия непостоянного шума на организм работников используется широкий спектр конструктивных, планировочных, технологических и организационных средств шумозащиты [2, 3]. Их эффективность во многом определяется точностью оценки уровней шума в исходной ситуации без специальных шумозащитных мероприятий и после проектирования средств шумозащиты.

Существующие методы расчета непостоянного шума ориентированы на определение только усредненных во времени энергетических параметров шума, а именно эквивалентных уровней. При этом используются методики расчета, разработанные применительно к расчетам постоянного шума. В России для этой цели используются методы, основанные на статистическом энергетическом подходе [4, 5], а в зарубежной практике применяются методы прослеживания лучей [6] и методы на основе диффузионного подхода [7, 8]. Такой подход исключает из оценки акустического режима и разработки средств защиты от непостоянного шума такие важные с гигиенической точки зрения параметры, как максимальный и минимальный уровни, разделение звукового поля на фоновую и переменную во времени составляющие, дозы шума и другие энергетические и временные характеристики [9]. По этой причине в настоящее время разработка методики детального расчета перечисленных выше параметров непостоянного шума является актуальной научной и практической задачей.

Анализ методов расчетов, используемых при исследованиях непостоянных акустических процессов, происходящих в помещениях, показывает, что во многих случаях непостоянные отраженные звуковые поля помещений удобно рассчитывать при помощи импульсного представления процессов излучения и распространения звуковой энергии.

**Импульсное представление процесса формирования звукового поля.** Если известна функция, задающая изменение плотности звуковой энергии в расчетной точке от короткого импульса, то легко рассчитываются энергетические параметры в этой точке при действии источника с любыми временными характеристиками, в том числе и уровни постоянного шума.

В результате действия короткого импульса звуковой энергии в расчетной точке помещения можно зафиксировать изменение во времени плотности звуковой энергии  $d\varepsilon_{\text{им}}$ . Длительное действие источников шума представляется в виде последовательности излученных импульсов энергии, результат их совместного действия рассчитывается по выражению

$$\varepsilon = \int_{t_n}^{t_k} d\varepsilon_{\text{им}}, \quad (1)$$

где  $t_n, t_k$  – временной интервал действия источника шума.

В случае переменной акустической мощности источника звука  $W$  величина изменения плотности звуковой энергии в расчетной точке от импульса  $d\varepsilon_{\text{им}}$  должна включать множитель для учета разницы в мощностях  $W/W_{\text{им}}$ .

**Функция отклика помещения на импульсное возбуждение.** При решении практических задач пользоваться величиной  $d\varepsilon_{\text{им}}$  неудобно. В этой связи в качестве инструмента для расчета непостоянных звуковых полей в дальнейшем предлагается использовать функцию отклика или нормализованное выражение изменения энергии воздействия импульса с единичной акустической мощностью

$$f(t) = \frac{d\varepsilon_{\text{им}}}{W_{\text{им}} dt}, \quad (2)$$

где  $T = \tau - t - r/c$  – приведенное время ( $t < \tau - r/c$ );  $c$  – скорость звука в воздухе. Величина приведенного времени зависит от времени наблюдения  $\tau$ , момента излучения импульса энергии  $t$  и запаздывания  $r/c$  прихода первых отражений (рис. 1). С достаточной точностью запаздывание определяется расстоянием  $r$  между источником шума и расчетной точкой.

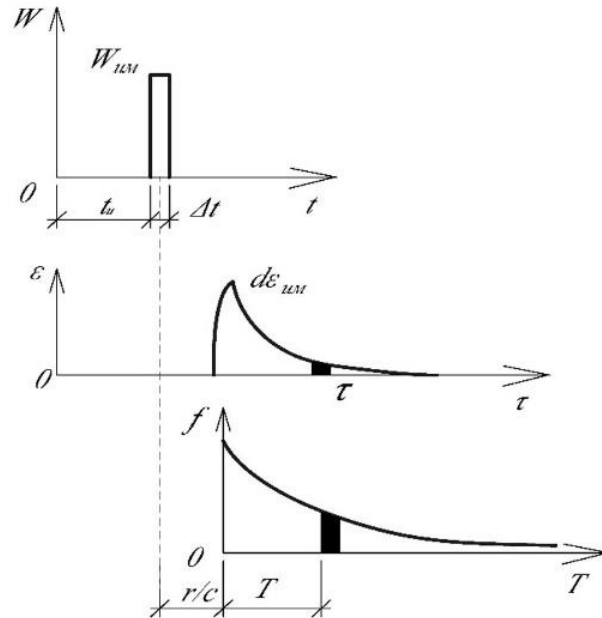


Рис. 1. Схема к расчету функции отклика пространства  $f$  на импульсное возбуждение

Метод функций отклика широко применяется в инженерных науках, например в теории автоматического регулирования, агроинженерии и т. п. Его принцип заключается в использовании информации об отклике системы на известные воздействия для получения оператора перехода на другие подобные воздействия. Отклик помещения на импульсное возбуждение используется в архитектурной акустике для анализа структуры прихода отраженных звуковых волн в расчетную точку, выявления факторов, снижающих качество восприятия сигналов [10].

Из уравнения (2) следует важное замечание, что отклик является реакцией помещения на импульсное возбуждение. Он пропорционален скорости изменения плотности звуковой энергии импульса в расчетной точке. Структура отклика зависит от взаимного положения источника шума и расчетной точки и от их размещения в помещении, а также определяется параметрами помещения: геометрическими характеристиками, акустическими параметрами ограждающих конструкций и т. д.

В случае использования функции отклика для решения практических задач по расчету параметров непостоянных звуковых полей выражение (1) можно представить в виде

$$\varepsilon = \int_{t_n}^{t_k} W f_{(T)} dt. \quad (3)$$

Выражение (3) имеет более очевидный физический смысл.

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая процесс образования отклика помещения.

Функция отклика помещения может определяться расчетным путем. Для помещений в форме прямоугольных параллелепипедов нами получено выражение в виде тройного ряда для расчета звукового поля отдельного импульса методом разделения переменных [2], для помещений сложной формы с различными отражающими характеристиками ограждений функция отклика рассчитывается численным методом [11].

В случае сложных ситуаций, когда требуется выполнить анализ вариантов работы оборудования (источников непостоянного шума большой мощности) на действующем предприятии и необходимо запроектировать оптимальные параметры его функционирования, возможно экспериментальное определение функции отклика. Для сложных систем, для которых не определена математическая модель, функцию отклика находят по принципу «черного» ящика, когда регистрируют реакцию системы на изменяемые факторы внешнего воздействия без исследования процессов, происходящих внутри самой системы.

**Методика экспериментального определения функции отклика помещения на импульсное воздействие.** Очевидным методом является регистрация значения плотности звуковой энергии короткого импульса в расчетной точке (рис. 1) и получение функции отклика по выражению

$$f_{(T)} = \frac{\varepsilon}{W_{\text{им}} \Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – длительность импульса.

Опыт использования методики показывает, что такой подход связан с достаточно большими погрешностями, т. к. результат зависит от точности акустической мощности импульса и величины его длительности. Для повышения точности надо уменьшать длительность излучения шума так, чтобы источник был импульсным, а это приводит к росту погрешностей.

Более точным и просто реализуемым подходом является экспериментальное определение функции отклика по регистрации затухания звуковой энергии при отключении длительно действующего источника постоянной акустической мощности. В этом случае проще определить акустическую мощность источника шума и не требуется находить длительность импульса. Графическая иллюстрация экспериментального определения функции отклика приведена на рис. 2. Из выражений (2), (3) и рис. 2 следует, что изменение скорости затухания звуковой энергии  $\Delta \varepsilon$  определяется площадью части графика функции источника  $f \Delta T$ .

Методика экспериментального определения функции отклика помещения заключается в следующем:

1. Определяется положение источников переменного шума и расчетных точек.

2. В районе шумного технологического оборудования устанавливается эталонный источник шума с известной акустической мощностью  $W$ , который создает постоянное звуковое поле в помещении. При определенных условиях в качестве эталонного источника может использоваться и действующее оборудование.

3. После отключения источника шума в одной или нескольких расчетных точках фиксируются графики затухания звуковой энергии.

4. Производится расчет функции отклика на основе обработки измеренных уровней звуковой энергии по выражению

$$f_{(T)} = \frac{-I_0(10^{0,1L_{\tau+\Delta\tau}} - 10^{0,1L_{\tau}})}{Wc\Delta\tau}, \quad (5)$$

где  $T = \tau - t_k - r/c$  – приведенное время;  $L_{\tau}$  и  $L_{\tau+\Delta\tau}$  – уровни звукового давления в момент времени  $\tau$  и  $\tau + \Delta\tau$  после отключения источника шума;  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – пороговое значение интенсивности звука;  $c$  – скорость звука в воздухе. Функция отклика представляет одномерный массив или ограниченный ряд.

5. На основе полученной функции отклика рассчитываются уровни шума в расчетной точке при различных временных и энергетических параметрах источника шума. Расчет интеграла (3) превращается в суммирование ряда для каждого расчетного момента времени  $\tau$ , что требует минимальных расчетных ресурсов.

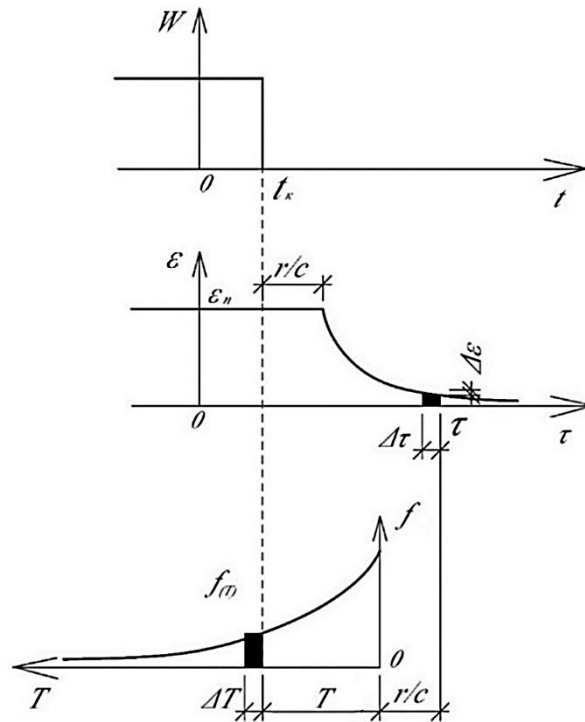


Рис. 2. Графическая иллюстрация расчета функции отклика по экспериментальным данным при отключении длительно действующего источника с постоянной акустической мощностью ( $\Delta T = \Delta\tau$ )

**Пример экспериментального определения и использования функции отклика помещения.** Определение функции отклика и исследование энергетических параметров в расчетной точке Т.3 при различных параметрах импульсного источника шума И.3 выполнено в коридоре 5-го этажа учебного корпуса Тамбовского государственного технического университета (рис. 3).

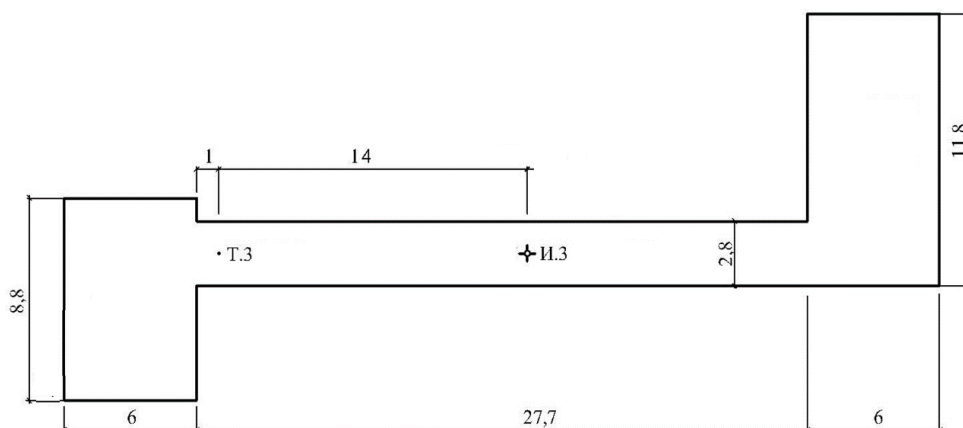


Рис. 3. Расчетная схема помещения:  
Т.3 – расчетная точка; И.3 – источник шума

Источник шума находился на расстоянии 14 м от расчетной точки. Исследования проводились в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Измеренный график реверберации в расчетной точке при отключении источника постоянного шума приведен на рис. 4. При исследованиях анализировался отраженный шум.

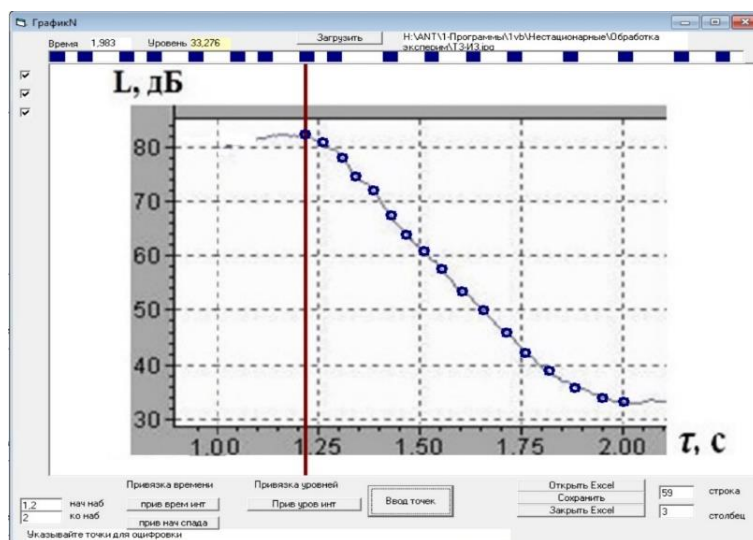


Рис. 4. Окно программы по обработке экспериментальных данных

Для обработки экспериментальных данных измеренные графики затухания звуковой энергии оцифрованы с помощью специально разработанной программы (рис. 4) и переведены в файл формата Microsoft Excel. Функция отклика помещения получена в результате применения выражения (5) к значениям уровней затухания звуковой энергии длительно действующего источника постоянного шума.

Функция отклика, полученная на основе измеренных значений затухания звуковой энергии, использована для анализа уровней шума в расчетной точке при различных параметрах источника импульсного шума.

На рис. 5 приведены графики изменения уровней звукового давления от импульсного источника шума с периодом излучения звуковой энергии  $T_n = 1$  с и с различной длительностью импульса  $\Delta t = 0,1, 0,2, 0,4$  с. Форма графика излучаемой источником энергии прямоугольная. На рисунке заметно сохранение формы графиков затухания звуковой энергии с изменением длительности импульса  $\Delta t = t_n - t_k$ . При каждом удвоении длительности импульса эквивалентный уровень возрастает на 3 дБ. Рост максимального уровня незначителен: 81,5, 82,1, 82,3 дБ. С уменьшением паузы между излучениями при одинаковом периоде снижается перепад между максимальным и минимальным уровнями на 15 дБ с  $\Delta L = 60$  до 45 дБ. При наличии фонового шума изменение перепада  $\Delta L$  будет меньше.

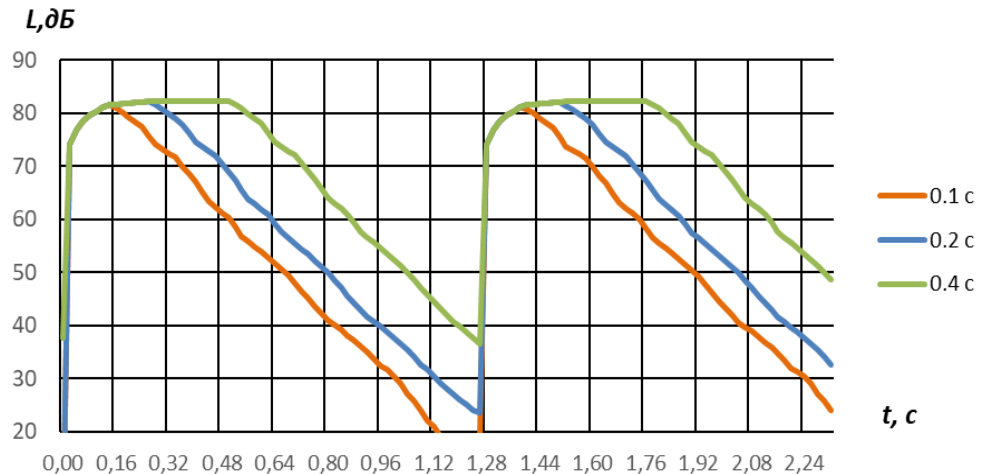


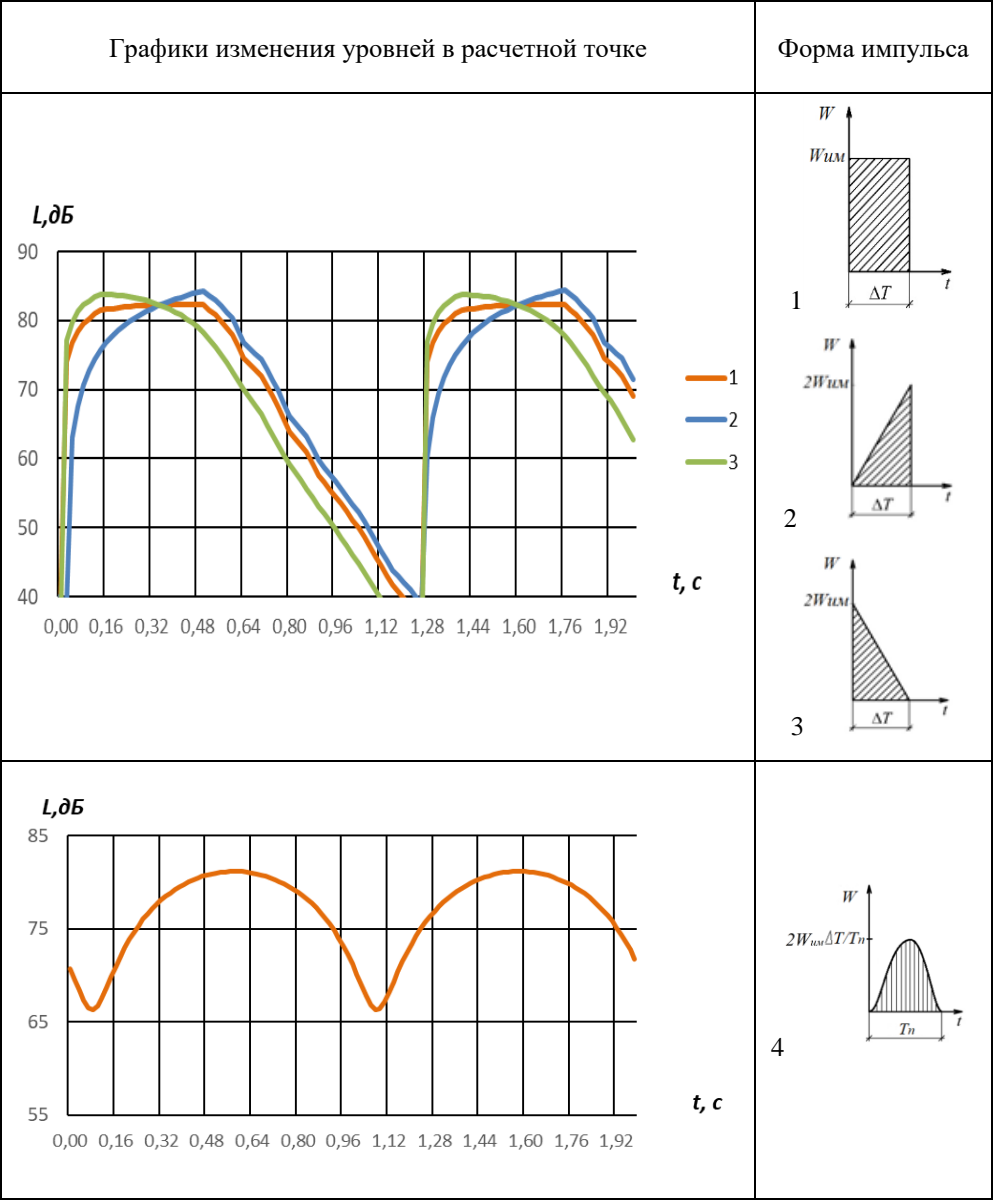
Рис. 5. Графики изменения уровней звукового давления в расчетной точке при действии прямоугольных импульсов различной длительности

В таблице приведены графики зависимости уровней импульсных источников от формы импульсов.

Период действия импульсов равен 1 с. Рассматривались прямоугольный импульс, импульсы с линейным нарастанием и снижением во времени акустической мощности. Длительность излучения этих импульсов составляла  $\Delta t = 0,4$  с. Длительность импульса с плавным изменением акустической мощности по закону косинуса равна периоду действия источника  $\Delta t = T_n = 1,0$  с.



Результаты расчета изменения уровней звукового давления  
в расчетной точке при различных формах импульсов



Акустическая мощность импульсных источников шума подбиралась таким образом, чтобы во всех случаях общая излучаемая энергия и эквивалентные уровни были одинаковыми. Максимальный уровень отраженного звука составляет наибольшее значение – 84,4 дБ при возрастании акустической мощности импульсного источника (см. форму № 2 таблицы). При плавном и незначительном изменении излучаемой энергии во времени (см. форму № 4 таблицы) максимальный отраженный уровень шума составляет 81,2 дБ.

### Выводы

1. Для быстрой и качественной оценки изменений шумового режима в помещениях с непостоянным во времени шумом при расчетах удобно использовать функцию отклика помещений на импульсное возбуждение. Изложена методика определения функции отклика на основе обработки графика затухания длительно действующего источника постоянного шума.

2. Функция отклика обладает полезными свойствами, позволяющими анализировать влияние различных факторов на шумовой режим помещений. Приведены примеры расчета энергетических параметров звукового поля в расчетной точке при действии непостоянного источника с различной формой излучаемых импульсов.

3. Использование функции отклика при исследованиях шумового режима в производственных помещениях с импульсными источниками позволяет оперативно определять зоны с неблагоприятным акустическим режимом и разрабатывать меры по уменьшению их размеров.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суворов Г.А., Лихницкий А.М. Импульсный шум и его влияние на организм человека. Ленинград : Медицина, 1975. 207 с.
2. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Расчеты импульсного шума при проектировании средств его снижения в производственных зданиях // Строительство и реконструкция. 2019. № 3 (83). С. 22–33.
3. Каньшин В.Б. Исследование воздействия и рассмотрение методов снижения шума импульсного характера на организм человека // Действие шума и вибрации на организм : материалы тезисов докладов III Всесоюзной конференции по борьбе с шумом и вибрацией. Челябинск, 1980. С. 24–27.
4. Giyasov B.I., Ledenev 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.
5. Tsukernikov I., Shubin I., Antonov A., Ledenev V., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016. 2017. P. 218–225. DOI:10.1016/j.proeng.2017.02.291
6. Visentin C., Valeau V., Prodi N., Picaut J. A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing // Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, ICA-2010. Sydney, Australia, 2010. P. 23–27.
7. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivité des parois au sein du modèle de diffusion acoustique // CFA/VISHNO-2016. 11–15 avril 2016.
8. Foy C., Valeau V., Picaut J., Prax C., Sakout A. Spatial variations of the mean free path in long rooms: Integration within the room-acoustic diffusion model // Proceedings of the 22 International Congress on Acoustics – 2016. Buenos Aires, 5–9 September 2016.
9. Шубин И.Л., Леденев В.И., Антонов А.И., Меркушева Н.П. Использование карт доз шума при разработке организационных мер шумозащиты в производственных помещениях с непостоянными рабочими местами // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2021. № 1 (16). С. 86–97.
10. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. Москва : Стройиздат, 1986. 173 с.
11. Antonov A.I., Ledenev V.I., Shubin I.L. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection // IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1079 (4):042044. DOI:10.1088/1757-899X/1079/4/042044

## REFERENCES

1. Suvorov G.A., Lihnickij A.M. Impul'snyj шум i ego vliyanie na organizm cheloveka [Pulse noise and its effect on human body]. Leningrad: Meditsina, 1975. 207 p. (rus)
2. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Raschety impul'snogo shuma pri proektirovanii sredstv ego snizheniya v proizvodstvennyh zdaniyah [Pulse noise calculations and its reduction in industrial buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019. No. 3(83). Pp. 22–33. (rus)
3. Kan'shin V.B. Issledovanie vozdejstviya i rassmotrenie metodov snizheniya шумов impul'snogo haraktera na organizm cheloveka [Impact and methods of reducing pulse noise on human body]. In: III Vsesoyuznaya konferenciya po bor'be s шумом i vibraciej: materialy tezisev dokladov sekcii "Dejstvie shuma i vibracij na organism" [Proc. 3rd All-Union Conf. on Noise and Vibration Prevention, Section "The Effect of Noise and Vibrations on Human Body"]. Chelyabinsk, 1980. Pp. 24–27. (rus)
4. Giyasov B.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 1 (77). Pp. 13–22.
5. Tsukernikov I., Shubin I., Antonov A., Ledenev V., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection. *Procedia Engineering. Proc. 3rd Int. Conf. 'Dynamics and Vibroacoustics of Machines'*. 2017. Pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.291
6. Visentin C., Valeau V., Prodi N., Picaut J. A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing. In: *Proc. 20th Int. Congr. on Acoustics*. Sydney, Australia, 2010. Pp. 23–27.
7. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivité des parois au sein du modèle de diffusion acoustique. CFA VISHNO, 2016.
8. Foy C., Valeau V., Picaut J., Prax C., Sakout A. Spatial variations of the mean free path in long rooms: Integration within the room-acoustic diffusion model. In: *Proc. 22nd Int. Congr. on Acoustics*. Buenos Aires, 2016.
9. Shubin I.L., Ledenev V.I., Antonov A.I., Merkusheva N.P. Ispol'zovanie kart doz shuma pri razrabotke organizacionnyh mer шумозашchity v proizvodstvennyh pomeshcheniyah s nepostoyannymi rabochimi mestami [Noise dose maps in the development of noise protection measures in industrial premises with non-permanent workplaces]. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura*. 2021. No. 1 (16). Pp. 86–97. (rus)
10. Makrinenko L.I. Akustika pomeshchenij obshchestvennyh zdaniy [Acoustics of public buildings]. Moscow: Stroizdat, 1986. 173 p. (rus)
11. Antonov A.I., Ledenev V.I., Shubin I.L. Numerical method for impulse noise calculation with diffuse sound reflection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1079. No. 4. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044

## Сведения об авторах

Антонов Александр Иванович, докт. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е; гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, aiant58@yandex.ru

Леденев Владимир Иванович, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е; гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, ledvi46@yandex.ru

Матвеева Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, times02@yandex.ru

Пороженко Марианна Александровна, вед. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, mporoz@mail.ru

**Authors Details**

*Aleksandr I. Antonov*, DSc, A/Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia; Leading Scientist, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia aiant58@yandex.ru

*Vladimir I. Ledenev*, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia; Leading Scientist, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, ledvi46@yandex.ru

*Irina V. Matveeva*, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, times02@yandex.ru

*Marianna A. Porozhenko*, Leading Scientist, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, mporoz@mail.ru