

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 169–180.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 169–180.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 534.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180

EDN: NJZQCP

ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ НЕПОСТОЯННОГО ВО ВРЕМЕНИ ШУМА В ПОМЕЩЕНИИ

Александр Иванович Антонов¹, Владимир Иванович Леденев^{1,2},
Ирина Владимировна Матвеева²

¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
г. Москва, Россия

²Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Одним из основных процессов, определяющих шумовой режим в производственных помещениях с импульсными источниками звука, является реверберация. При ее исследовании используются данные о коэффициентах звукопоглощения ограждений, в том числе и звукопоглощающих облицовок, применяемых для снижения импульсного шума. Известно, что коэффициенты звукопоглощения эффективных звукопоглощающих материалов облицовок могут существенно изменяться в пределах октавных полос частот. Поэтому рекомендуемое в нормативной литературе использование при расчетах среднеарифметических октавных коэффициентов звукопоглощения для таких материалов может приводить к значительным ошибкам при оценке протекающих в помещениях реверберационных процессов.

Цель. Установление на основе компьютерного моделирования реверберационных процессов в помещениях значений коэффициентов звукопоглощения эффективных звукопоглощающих материалов, обеспечивающих необходимую точность расчета в октавных полосах частот характеристик непостоянных во времени звуковых полей помещений.

Результаты. На основе предложенной компьютерной методики установлено, что в случае значительных изменений коэффициентов звукопоглощения в октавной полосе частот процесс затухания октавного уровня звука определяется скоростью снижения звука в третьоктавной полосе частот с минимальным средним коэффициентом звукопоглощения. Этот коэффициент и следует принимать при исследованиях реверберационных процессов в помещениях с эффективными звукопоглощающими облицовками.

Ключевые слова: реверберация звука, октавные уровни звука, коэффициент звукопоглощения, звукопоглощающие облицовки

Для цитирования: Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Выбор коэффициентов звукопоглощения акустически эффективных материалов при расчете непостоянного во времени шума в помещении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 169–180. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180. EDN: NJZQCP

ORIGINAL ARTICLE

SELECTION OF SOUND ABSORPTION COEFFICIENTS OF ACOUSTICALLY EFFECTIVE MATERIALS IN CALCULATING TIME-VARIABLE NOISE IN A ROOM**Aleksandr I. Antonov¹, Vladimir I. Ledenev^{1,2}, Irina V. Matveeva²**¹ *Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia*² *Tambov State Technical University, Tambov, Russia*

Abstract. Reverberation is one of the main processes that determines noise in industrial premises with pulsed sound sources. Its study uses data on the sound absorption coefficients of fences, including acoustical lining used to reduce the pulse noise. It is known that the sound absorption coefficient of effective acoustical lining can vary significantly within the octave frequency bands. Therefore, it is recommended to use arithmetic mean octave sound absorption coefficients according to regulatory documents, otherwise, it can lead to significant errors in the assessment of reverberation processes occurring in rooms.

Purpose: Using computer modeling of reverberation processes in rooms, to measure the sound absorption coefficient of effective sound-absorbing materials, ensuring the calculation accuracy in octave frequency bands of time-variable noise in a room.

Research findings: Based on the proposed computer technique, it is found that in the case of significant changes in the sound absorption coefficient in the octave frequency band, the attenuation of the octave sound level is determined by the rate of sound decrease in the third-octave frequency band with a minimum average sound absorption coefficient. This coefficient should be taken into account when studying reverberation processes in rooms with acoustical lining.

Keywords: sound reverberation, octave sound levels, sound absorption coefficient, acoustical lining

For citation: Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Selection of Sound Absorption Coefficients of Acoustically Effective Materials in Calculating Time-Variable Noise in a Room. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2026; 28 (1): 169–180. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180. EDN: NJZQCP

Введение

На многих промышленных предприятиях осуществляются технологические процессы, при выполнении которых в помещении образуется импульсный шумовой режим, оказывающий негативное воздействие на организм рабочих [1]. При его гигиенической оценке и разработке мероприятий по ограничению его воздействия на организм человека необходимо иметь сведения о ненормируемых в настоящее время показателях импульсного шума, а именно о максимальных и минимальных уровнях импульсов, об их соотношениях между собой при изменениях длительности импульсов, частоты их следования, а также о скорости затухания звуковой энергии в промежутках времени между импульсами [2, 3]. Для этого требуются данные о пространственно-временных характеристиках импульсного шума [4]. Получить их возможно при исследованиях реверберационных процессов, протекающих в помещениях с импульсными источниками звука.

В настоящее время имеются методы расчетов отраженных звуковых полей, на основе которых возможно моделировать реверберационные процессы

в помещениях и, соответственно, определять указанные выше ненормируемые показатели импульсного шума. К ним относятся: классический метод диффузного звукового поля [5], статистические энергетические методы, основанные на представлениях о квазидиффузном звуковом поле [6, 7], метод однородных дискретных цепей Маркова [8, 9], метод интегрального уравнения Куттруфа [10]. Во всех случаях при использовании перечисленных выше методов расчета необходимо иметь сведения о средних коэффициентах звукопоглощения материалов ограждений в исследуемых октавных полосах частот.

В п. 4.2. ГОСТ Р ЕН 12354-6–2012 «Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 6. Звукопоглощение в закрытых пространствах»¹ указывается, что «исходные данные для расчетов в октавных полосах могут быть получены усреднением соответствующих третьоктавных значений». В ГОСТ 31705–2011 «Материалы звукопоглощающие, применяемые в зданиях. Оценка звукопоглощения»² также указано, что коэффициент звукопоглощения в октавной полосе частот следует определять как среднеарифметическое значение коэффициентов звукопоглощения в третьоктавных полосах частот, входящих в состав октавы. При этом в ГОСТ Р ЕН 12354-6–2012 отмечается, что для узкополосных звукопоглотителей использование средних третьоктавных значений в качестве исходных данных для расчетов в октавных полосах не всегда обеспечивает необходимую точность расчетов. Это замечание также справедливо и для звукопоглощающих конструкций, частотные коэффициенты звукопоглощения которых значительно изменяются в октавной полосе. Коэффициенты звукопоглощения (КЗП) современных эффективных звукопоглощающих облицовок могут изменяться в 2 и более раза в пределах октавы [11]. В этом случае при расчете непостоянных звуковых полей в октавной полосе частот с использованием среднеарифметических третьоктавных значений КЗП погрешность может достигать более десяти децибел.

В статье на основе результатов компьютерного моделирования процессов реверберации разработаны предложения по выбору КЗП, обеспечивающих необходимую точность при расчете в октавных полосах частот непостоянных во времени звуковых полей помещений и исследованиях в них процессов реверберации.

Методика исследования процессов реверберации при изменяющихся в октаве величинах КЗП

Согласно статистической теории диффузного звукового поля в соразмерных помещениях процессы реверберации описываются выражениями Сэбина или Эйринга [5]. В данном случае для расчета процесса затухания звуковой энергии после отключения источника звука будет использоваться более простое выражение Сэбина, имеющее вид

¹ ГОСТ Р ЕН 12354-6–2012. Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 6. Звукопоглощение в закрытых пространствах: нац. стандарт Российской Федерации. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 20 с.

² ГОСТ 31705–2011. Материалы звукопоглощающие, применяемые в зданиях. Оценка звукопоглощения: нац. стандарт Российской Федерации. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 8 с.

$$\varepsilon_t = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}cS} \exp(-\bar{\alpha}ct / \bar{l}), \quad (1)$$

где W , $\bar{\alpha}$ – общая акустическая мощность источника шума и средний КЗП ограждений в октавной полосе частот; c – скорость звука в воздухе; S – площадь ограждающих поверхностей помещения; t – время после отключения источника звука; $\bar{l}$ – средняя длина свободного пробега звука в помещении.

Исследования показывают, что полученные на основе формулы Сэбина закономерности могут быть применимы и для расчетов с использованием выражения Эйринга.

С учетом зависимости от частоты звука величин акустической мощности источника звука W_x и КЗП ограждений α_x вместо выражения (1) при анализе следует использовать более точное уравнение

$$\varepsilon_t = \int_0^1 \frac{4W_x(1-\alpha_x)}{\alpha_x cS} \exp(-\alpha_x ct / \bar{l}) dx. \quad (2)$$

В этом случае для интегрирования по октавному частотному диапазону использована безразмерная переменная $x \in \{0-1\}$. Ее применение позволяет перейти от логарифмической шкалы абсцисс к линейной шкале и упростить вычисления. Величина переменной x связана с частотой звука f выражением

$$f = f_n + (f_v + f_n)x \text{ при } x \in \{0, 1\}, \quad (3)$$

где f_v , f_n – верхняя и нижняя границы частотного диапазона.

В случае, когда акустическая мощность источника в пределах октавной полосы может быть принята постоянной, величину W_x в (2) можно вынести за знак интеграла.

Сложный характер подынтегрального выражения и аппроксимационных функций для W_x и α_x приводит к громоздкому аналитическому решению уравнения (2). По этой причине расчет и анализ процесса реверберации с учетом частотных акустических характеристик выполнен численным методом на основе специально разработанной компьютерной программы.

Расчеты затухания звуковой энергии выполнены для условного помещения с площадью ограждающих поверхностей $S = 200 \text{ м}^2$, в котором все внутренние поверхности ограждений облицованы звукопоглощающим материалом. Для облицовки поверхностей условного помещения применен материал K-FONIK FIBER-P 30 толщиной 30 мм с наибольшим относительным изменением звукопоглощающих свойств в пределах октавной полосы со среднегеометрической частотой $f_{cp} = 500 \text{ Гц}$. Частотная характеристика этого материала в пределах октавы приведена на рис. 1.

Октавный коэффициент звукопоглощения в полосе с $f_{cp} = 500 \text{ Гц}$, рассчитываемый на основе арифметического усреднения частотной характеристики согласно ГОСТ 31705–2011, составляет $\bar{\alpha} = 0,268$. Правомомерность применения этого коэффициента при расчете непостоянных звуковых полей и, в частности, процесса реверберации показана на основе численного моделирования поля с использованием выражения (2). Акустическая мощность источника звука принята постоянной в пределах октавной полосы, и ее уровень равен 93,2 дБ.

Для численного расчета интеграла (2) октавный диапазон разбит на 21 частотную полосу с соответствующими значениями средних КЗП ограждений в каждой частотной полосе (рис. 1). Акустическая мощность источника шума равномерно распределена по 21 полосе частот, в каждой из которых уровень акустической мощности составил $L_W = 93,2 - 10\lg(21) = 80\text{дБ}$.

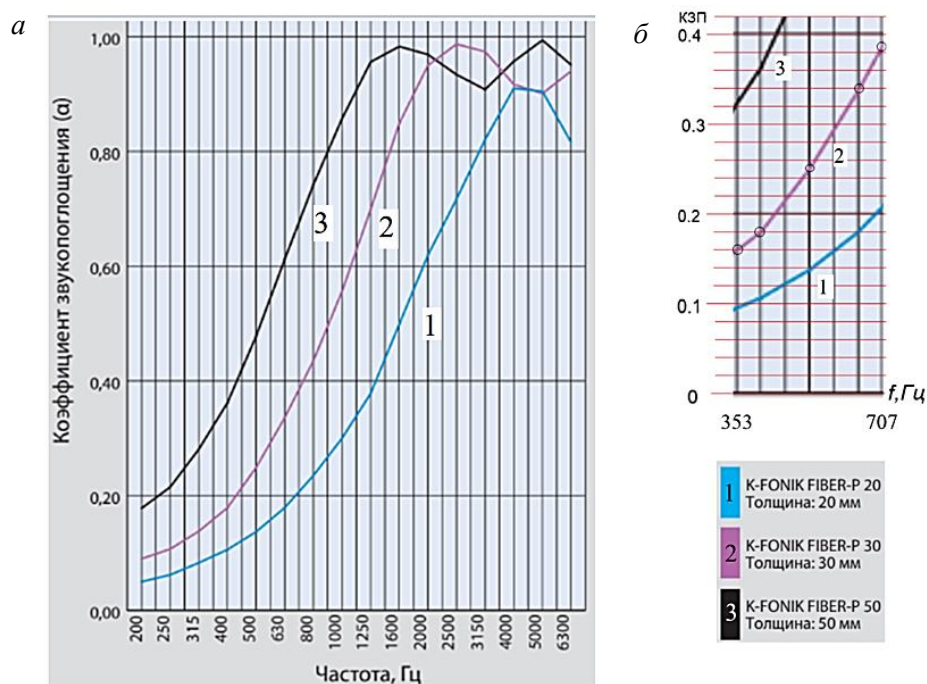


Рис. 1. Графики изменения коэффициента звукопоглощения материалов К-FONIK FIBER (а) и К-FONIK FIBER-P30 толщиной 30 мм в пределах октавной полосы со среднегеометрической частотой $f_{ср} = 500\text{ Гц}$ (б)

Fig. 1. Changes in the sound absorption coefficient of K-FONIK FIBER (a) and K-FONIK FIBER-P30 (b) materials 30 mm thick within an octave band with an average geometric frequency of 500 Hz

Результаты расчетов затухания уровней звуковой энергии в пределах частотной полосы анализа приведены на рис. 2. На графике пунктирной линией показано рассчитанное затухание общей октавной звуковой энергии, цветными линиями отмечены результаты затухания уровней звуковой энергии в различных поддиапазонах частот октавной полосы анализа. Поскольку в пределах октавной полосы КЗП материалы изменяются от 0,16 до 0,385 (рис. 1, б), то и скорость затухания уровней звукового давления на отдельных частотах изменяется в такой же степени. На графиках по оси X использованы относительные значения времени в долях от времени реверберации T октавного уровня, определенного по выражению Сэбина с учетом среднего КЗП, равного $\bar{\alpha} = 0,268$.

Согласно ГОСТ 31705–2011, затухание октавных и третьоктавных уровней следует рассчитывать на основе среднеарифметических значений КЗП, ко-

торые в данном случае в пределах каждой третьоктавной полосы составляют: $\bar{\alpha}_{1cp} = 0,194$; $\bar{\alpha}_{2cp} = 0,260$; $\bar{\alpha}_{3cp} = 0,349$.

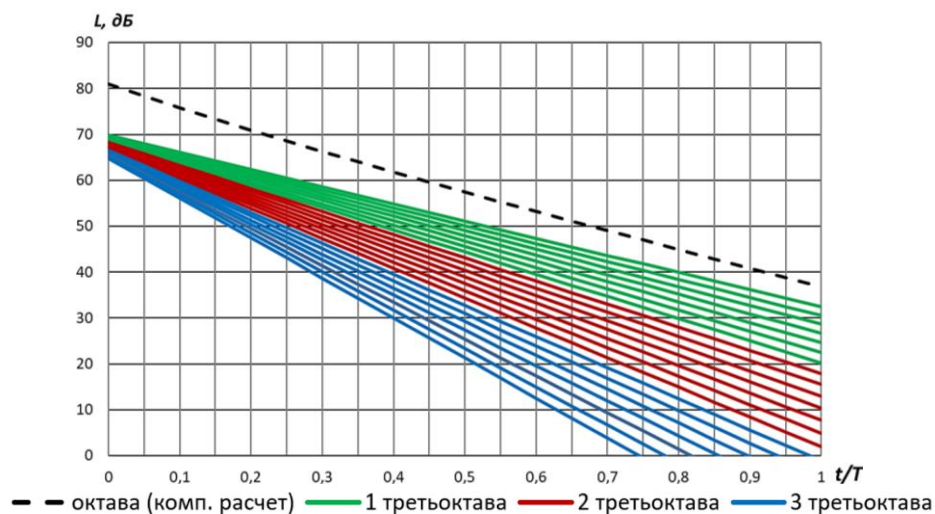


Рис. 2. Графики затухания энергии после отключения источника звука в пределах октавной полосы частот: T – время реверберации при среднем коэффициенте звукопоглощения $\bar{\alpha} = 0,268$

Fig. 2. Energy attenuation after switching off the sound source within the octave frequency band. $\bar{\alpha} = 0.268$ is the reverberation time at the average sound absorption coefficient

Линиями черного цвета на рис. 3 обозначено затухание уровней шума в третьоктавных полосах частот по средним третьоктавным значениям КЗП материала. Результаты расчетов показали, что фактическое затухание звуковой энергии в каждой из третьоктавных полос происходит медленнее (см. пунктирные линии и линии черного цвета на графиках рис. 3). Видно, что затухание звука в пределах каждой из частотных полос определяется главным образом затуханием составляющей энергии с минимальным КЗП, равным для используемого примера: $\alpha_{1m} = 0,170$; $\alpha_{2m} = 0,228$; $\alpha_{3m} = 0,307$.

Фактическое затухание звуковой энергии в третьоктавных полосах частот по результатам компьютерного расчета (пунктирные линии на графиках рис. 3) на начальном этапе происходит с более высокой скоростью, за счет чего скорость затухания энергии соответствует третьоктавным значениям КЗП большим, чем значения α_{im} , но меньшим, чем значения $\bar{\alpha}_{i_{cp}}$, т. е.:

$$\alpha_{1p} = 0,185; \alpha_{2p} = 0,248; \alpha_{3p} = 0,334.$$

Рассчитанные значения КЗП α_{ip} близки к величинам, рассчитываемым как $\alpha_{i_{cp}} = 0,5(\bar{\alpha}_{i_{cp}} + \alpha_{im})$. Их рекомендуется использовать в практических расчетах затухания третьоктавных уровней. Значения обеспечивают достаточную точность при расчетах и при этом легко вычисляются. В данном случае они равны: $\alpha_{1cp} = 0,182$; $\alpha_{2cp} = 0,244$; $\alpha_{3cp} = 0,328$.

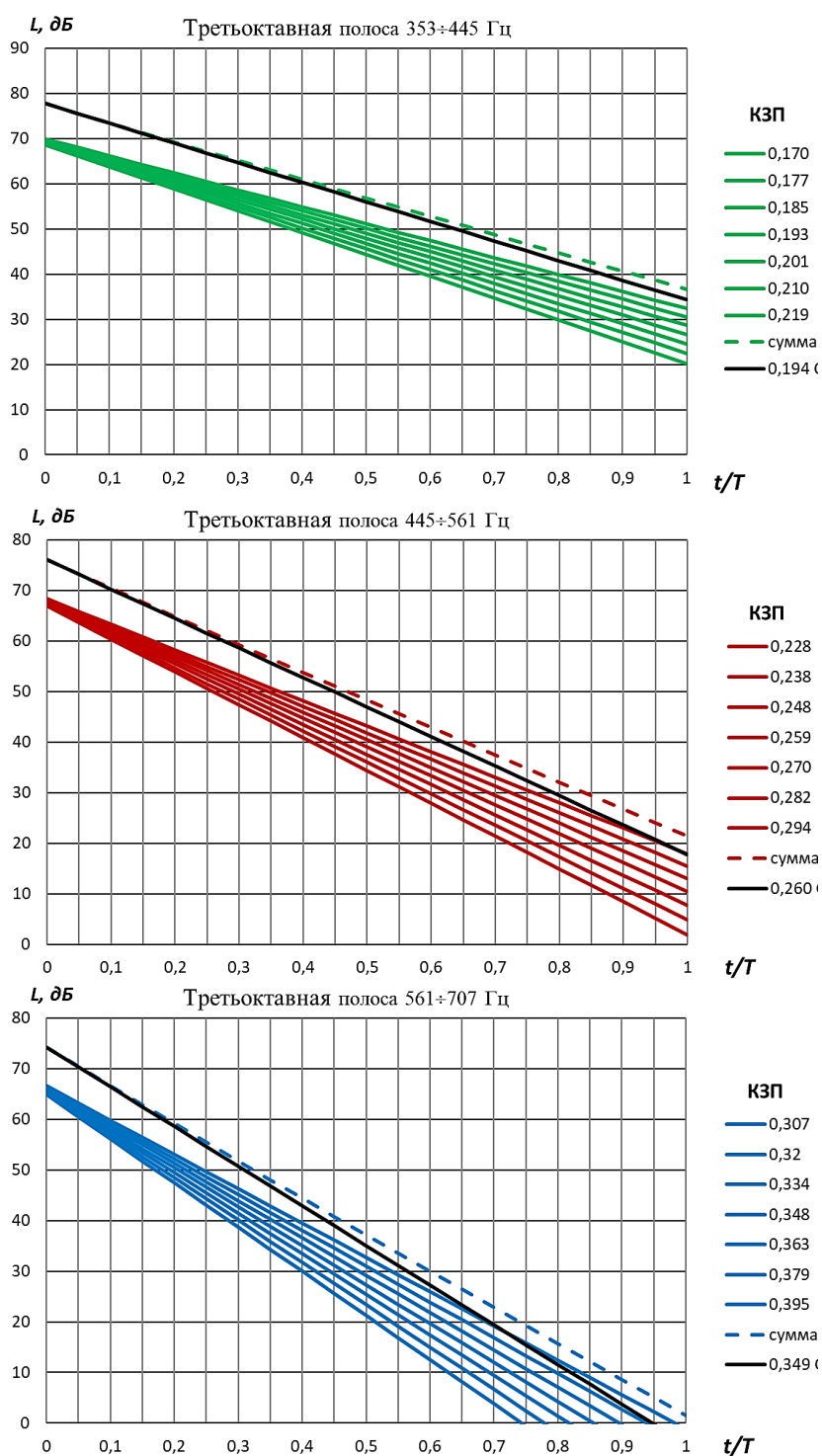


Рис. 3. Графики затухания звука в пределах третьооктавных полос
Fig. 3. Sound attenuation within one-third octave bands

Указанные различия в значениях $\alpha_{им}$, α_{ip} и $\alpha_{i_{cp}}$ необходимо учитывать при обработке экспериментальных реверберограмм и, соответственно, при последующем использовании значений КЗП в расчетах.

На рис. 4 приведены графики затухания общей октавной звуковой энергии и энергий в третьоктавных полосах частот. Рассчитанный график затухания суммарной звуковой энергии с использованием среднего октавного коэффициента звукопоглощения, равного $\bar{\alpha} = 0,268$ (пунктирная линия красного цвета на рис. 4), значительно отличается от графика реверберации, полученного на основе компьютерного расчета. Расхождение в уровнях превышает 35 дБ. На основе графиков затухания октавной энергии (см. рис. 2) установлено, что скорость снижения звука пропорциональна коэффициенту звукопоглощения 0,19. Из сравнения графиков видно, что затухание октавной звуковой энергии в значительной степени определяется затуханием звука в третьоктавной полосе с минимальным средним коэффициентом звукопоглощения $\bar{\alpha}_{1_{cp}} = 0,194$.

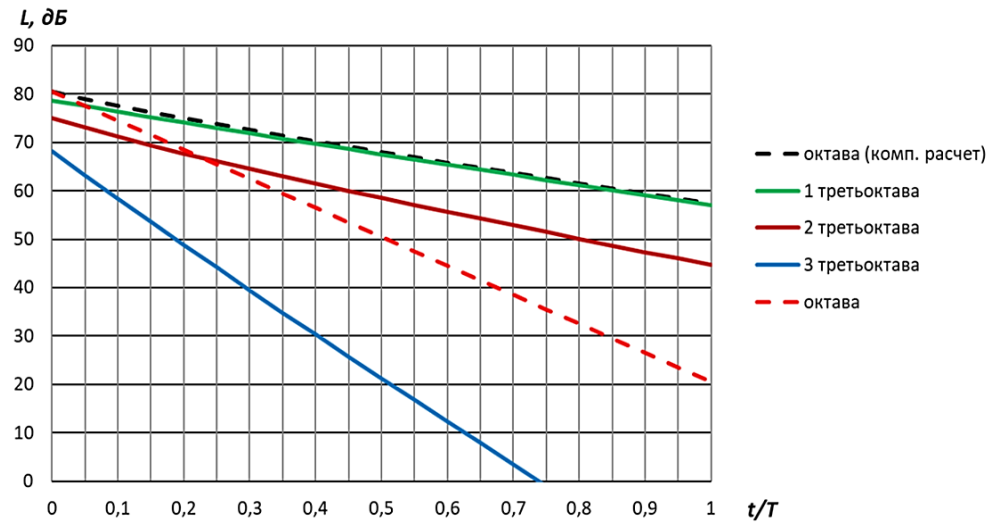


Рис. 4. Графики затухания звуковой энергии после отключения источника звука
Fig. 4. Sound energy attenuation after switching the sound source off

Аналогичные результаты были получены в других частотных полосах и для других звукопоглощающих материалов. По этой причине для практических расчетов затухания звука в пределах октавы рекомендуется в качестве октавного КЗП использовать среднее минимальное значение КЗП из третьоктавных полос, входящих в октаву. В данном случае $\alpha_{окт} = \bar{\alpha}_{1_{cp}} = 0,194$.

Принципиально иной по сравнению с графиками затухания звуковой энергии имеют вид графики нарастания уровней звуковой энергии после включения источника звука.

Согласно закономерности Сэбина, нарастание октавной звуковой энергии происходит по выражению

$$\varepsilon_t = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}cS} [1 - \exp(-\bar{\alpha}ct / \bar{l})] \quad (4)$$

или с учетом частотной характеристики звукопоглощения

$$\varepsilon_t = \frac{4W}{cS} \int_0^1 \frac{(1-\alpha_x)}{\alpha_x} [1 - \exp(-\alpha_x ct / \bar{l})] dx. \quad (5)$$

Как и в предыдущем случае, компьютерный расчет выполнен в октавной полосе с $f_{cp} = 500$ Гц, разделенный на 21 частотный диапазон. Расчетные графики приведены на рис. 5.

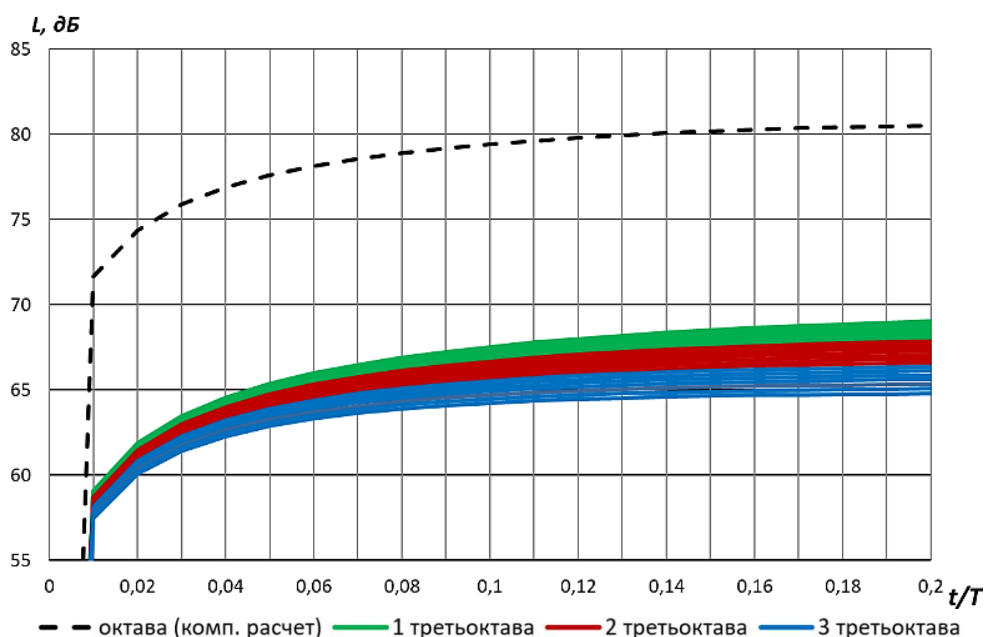


Рис. 5. Графики нарастания энергии после включения источника звука в пределах октавной полосы частот: T – время реверберации при среднем коэффициенте звукопоглощения $\bar{\alpha}$

Fig. 5. Energy increase after switching the sound source on within the octave frequency band. $\bar{\alpha}$ is the reverberation time at the average sound absorption coefficient

В отличие от процесса затухания звука (см. рис. 2), графики нарастания уровней отраженного звука почти совпадают, а скорость нарастания уровней звука практически не зависит от КЗП ограждения. Различия в графиках в основном определяются первым сомножителем в выражении (4) или величиной отраженной энергии в соответствующей частотной полосе.

Полученные результаты расчета показали, что процесс нарастания октавного уровня отраженного звука с достаточной точностью описывается выражением (4) с использованием арифметического усредненного среднего КЗП ограждения $\bar{\alpha} = 0,268$ (рис. 6).

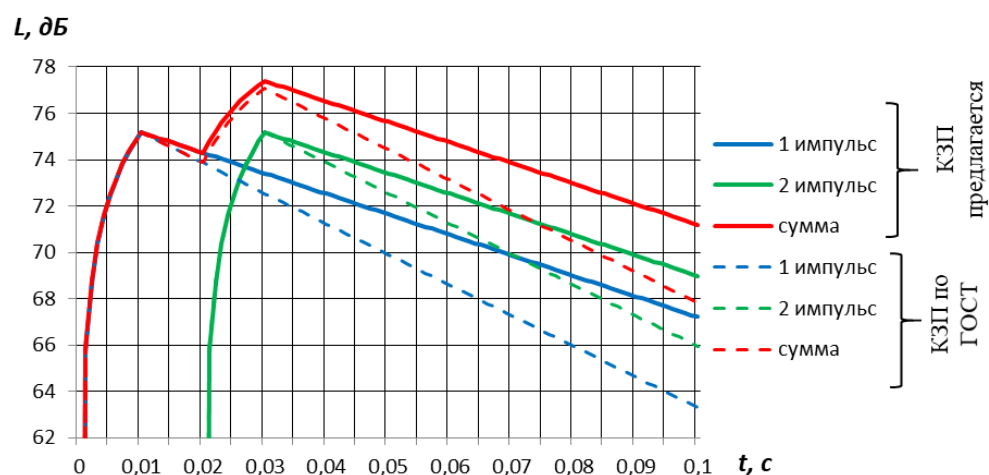


Рис. 6. Октавные уровни отраженного шума при действии двух импульсов
Fig. 6. Octave levels of reflected noise under the action of two pulses

На рис. 6 приведены рассчитанные октавные уровни отраженного звука при действии двух импульсов звука продолжительностью по 0,01 с. Расчеты выполнены для двух вариантов октавных КЗП ограждений: по требованиям государственного стандарта как среднеарифметических третьоктавных значений $\alpha_{\text{окт}} = \bar{\alpha} = 0,268$ и на основе рекомендаций, приведенных в данной статье, $\alpha_{\text{окт}} = \bar{\alpha}_1 = 0,194$.

Заключение

В целом выполненные исследования процессов нарастания и затухания непостоянного во времени звука показали, что процесс нарастания звука с достаточной точностью рассчитывается с использованием арифметически усредненного октавного коэффициента звукопоглощения. Затухание звука в значительной степени зависит от частотной характеристики звукопоглощения.

В случае больших изменений КЗП в пределах октавной полосы частот скорость затухания октавного уровня звука определяется скоростью снижения шума в тех третьоктавных полосах частот, в пределах которых коэффициент звукопоглощения минимален. При практических расчетах скорость снижения октавного шума следует принимать равной минимальной скорости снижения третьоктавного уровня из входящих в октаву третьоктавных полос.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. Методика расчета ненормируемых показателей импульсного шума, используемых при оценке шумового режима в производственных зданиях // Приволжский научный журнал. 2024. № 2 (70). С. 9–19.
3. Шубин И.Л., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Расчеты ненормируемых параметров импульсного шума при выборе средств его снижения в производственных зданиях // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 5 (1077). С. 20–23.

4. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Соломатин Е.О. Методы оценки пространственно-временных изменений импульсного шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях // Приволжский научный журнал. 2021. № 4 (60). С. 9–16.
5. Маньковский В.С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. Москва : Искусство, 1966. 375 с.
6. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 274 с.
7. Antonov A., Ledenev V., Shubin I. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044
8. Gerlach R., Meliert V. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale berprufung // Acustica. 1975. V. 32. № 4. S. 217–227.
9. Головки А.В., Леденев В.И., Островская А.А. Методика оценки процесса реверберации в помещении на основе однородных дискретных цепей Маркова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы VIII Международной научно-практической конференции. Тамбов : Издательство ИП Чеснокова А.В., 2021. С. 191–196.
10. Kuttruff H., Strassen T. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform // Acustica. 1980. V. 45. № 4. P. 246–255.
11. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И., Сидорина А.В. Акустические и динамические характеристики эластомерных строительных материалов на основе NBR каучука // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 56–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61

REFERENCES

1. Suvorov G.A., Lixniczkij A.M. Pulse Noise and its Effect on the Human Body. Leningrad: Medicina, 1975. 207 s. (In Russian)
2. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Methodology for Calculating Non-Normalized Pulse Noise Indicators used in Noise Assessment in Industrial Buildings. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2024; 2 (70): 9–19. (In Russian)
3. Shubin I.L., Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Calculations of Non-Normalized Parameters of Pulse Noise when Choosing Means to Reduce it in Industrial Buildings. *Byulleten stroitel'noi tekhniki*. 2024; 5 (1077): 20–23. (In Russian)
4. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Solomatin E.O. Estimation of Spatiotemporal Changes in Pulse Noise in Noise Protection of Industrial Buildings. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2021; 4 (60): 9–16. (In Russian)
5. Man'kovskii V.S. Acoustics of Studios and Halls for Sound Reproduction. Moscow: Iskusstvo. 1966. 375 p. (In Russian)
6. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Calculation of Noise Protection of Industrial Buildings. Moscow, Berlin: Direkt-Media, 2020. 274 p. (In Russian)
7. Antonov A., Ledenev V., Shubin I. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044
8. Gerlach R., Meliert V. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale berprufung. *Acustica*. 1975; 32 (4): 217–227.
9. Golovko A.V., Ledenev V.I., Ostrovskaya A.A. Evaluation of the reverberation process in a room based on homogeneous discrete Markov circuits. In: *Proc. 7th Sci. Conf. 'Stable Regional Development: Architecture, Construction, Transport'*. Tambov: Chesnokova A.V. 2021. Pp. 191–196. (In Russian)
10. Kuttruff H., Strassen T. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform. *Acustica*. 1980; 45 (4): 246–255.
11. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Sidorina A.V. Acoustic and Dynamic Characteristics of Elastomeric Building Materials based on NBR Rubber. *Stroitel'nye materialy*. 2019; (6): 56–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61 (In Russian)

Сведения об авторах

Антонов Александр Иванович, докт. техн. наук, доцент, 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, д. 112, корп. Е; 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, д. 112, корп. Е, times02@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr I. Antonov, DSc, A/Professor, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 21, Locomotive passage, 127238, Moscow, Russia, aiant58@yandex.ru

Vladimir I. Ledenev, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, ledvi46@yandex.ru

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

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.