
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 83–94.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 83–94.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 534.83

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-83-94

РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ОБЛИЦОВОК, РАЗМЕЩАЕМЫХ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГАЗОВОЗДУШНЫХ КАНАЛАХ

Александр Иванович Антонов^{1, 2}, Владимир Петрович Гусев²,
Владимир Иванович Леденев^{1, 2}, Ирина Владимировна Матвеева¹

¹ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

Аннотация. На шумовую обстановку современных мегаполисов оказывают влияние расположенные в их пределах мощные энергетические объекты – теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Одними из основных источников шума ТЭЦ являются устья газозвудушных систем. Для снижения излучаемого ими шума возможно использовать звукопоглощающие облицовки, размещаемые в каналах газозвудушных систем. В статье предложен метод оценки акустической эффективности облицовок, позволяющий определять наиболее рациональное расположение облицовок в каналах и их оптимальные размеры. С использованием предложенного метода выполнена оценка эффективности расположения звукопоглощающих облицовок в крупногабаритных каналах сложной формы.

Ключевые слова: промышленные предприятия, газозвудушные каналы, расчет, шум в каналах, звукопоглощающие облицовки, звукопоглощение

Благодарности: статья подготовлена по результатам совместных исследований, выполненных НИИ строительной физики РААСН и Академического научно-технического центра по строительству и архитектуре РААСН (НТЦС ТГТУ), образованного в ФГБОУ ВО ТГТУ по инициативе академика РААСН Е.М. Чернышова.

Для цитирования: Антонов А.И., Гусев В.П., Леденев В.И., Матвеева И.В. Расчет акустической эффективности звукопоглощающих облицовок, размещаемых в крупногабаритных газозвудушных каналах // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 83–94. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-83-94.

Original article

CALCULATION OF ACOUSTIC EFFICIENCY OF SOUND-ABSORBING LININGS PLACED IN LARGE-SIZED GAS-AIR CHANNELS

Aleksandr I. Antonov^{1, 2}, Vladimir P. Gusev², Vladimir I. Ledenev^{1, 2},
Irina V. Matveeva¹

¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia

² Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy Architecture
and Construction Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The noise environment of modern megacities is influenced by powerful energy facilities located within them – thermal power plants (CHP). One of the main sources of CHP noise are the mouths of gas-air systems. To reduce the noise emitted by them, it is possible to use sound-absorbing linings placed in the channels of gas-air systems. The article proposes a method for evaluating the acoustic efficiency of the linings, which allows determining the most rational arrangement of the linings in the channels and their optimal dimensions. Using the proposed method, an assessment of the effectiveness of the location of sound-absorbing linings in large-sized channels of complex shape was performed.

Keywords: industrial enterprises, gas-air channels, calculation, noise in channels, sound-absorbing linings, sound absorption

Acknowledgments: the article was prepared based on the results of joint research carried out by the Research Institute of Building Physics of the RAASN and the Academic Scientific and Technical Center for Construction and Architecture of the RAASN (STCC TSTU), formed in the TSTU on the initiative of Academician of the RAASN E.M. Chernyshov.

For citation: Antonov A.I., Gusev V.P., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Calculation of acoustic efficiency of sound-absorbing linings placed in large-sized gas-air channels. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 83–94. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-83-94.

Введение. Мощные энергетические объекты, предназначенные для обеспечения современных мегаполисов теплом и электрической энергией, создают на прилегающих к ним городских территориях повышенные уровни шума [1]. При этом существенное влияние на шумовой режим городской застройки оказывает шум, излучаемый устьями газоздушных систем теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). К таким источникам в первую очередь относятся открытые концы крупногабаритных газовых и воздушных каналов систем тяги и дутья энергетических котлов ТЭЦ. Для снижения шума, излучаемого ими в окружающее пространство, применяются пластинчатые глушители. Однако, как показывает практика, применение таких глушителей осложняется их большими размерами и необходимостью уширения каналов в местах их установки. В случае размещения глушителей на уже действующих предприятиях могут отсутствовать свободные места для их установки.

Менее затратным способом снижения шума, излучаемого устьями каналов, является устройство звукопоглощающих облицовок на внутренних поверхностях каналов. Использование звукопоглощающих материалов в виде трубчатых глушителей для снижения шума в каналах – один из наиболее

эффективных методов снижения шума внутри каналов, в транзитных помещениях, через которые они проходят, а также вблизи устьев каналов.

Оценка эффективности таких шумозащитных конструкций в настоящее время осуществляется по упрощенным методикам. Как правило, в виде табличных данных приводится степень снижения акустической мощности в зависимости от толщины звукопоглощающего материала, размеров поперечного сечения воздуховода и частоты звука. При этом не учитываются важные факторы, которые влияют на эффективность звукопоглощающих конструкций. К ним относятся фактическая звукопоглощающая характеристика материалов и их положение в воздуховоде. В случае расположения звукопоглощающего материала рядом с поворотом воздуховода нет методов оценки эффективности шумозащиты в зависимости от места расположения и размеров зоны облицовки.

Для выбора и проектирования звукопоглощающих облицовок в канале необходимо иметь методы расчета распространения звуковой энергии внутри каналов, обеспечивающие необходимую точность при оценке влияния на акустическую эффективность облицовок перечисленных выше факторов. В статье предложен метод расчета шума в крупногабаритных каналах и на его основе произведена оценка акустической эффективности звукопоглощающих облицовок, размещаемых в каналах с поворотами.

Оценка акустической эффективности облицовок производится путем сравнения полученных расчетных данных об уровнях шума в канале без облицовок с данными, полученными после устройства в нем звукопоглощающих облицовок. Для этого необходимо иметь метод расчета распространения звуковой энергии в канале, объективно оценивающий изменения звуковой энергии при изменениях акустических характеристик поверхностей канала. Выбор расчетного метода во многом определяется характером отражения звука от стенок канала [2]. В каналах с металлическими стенками характер отражения может быть зеркальным, диффузным или зеркально-диффузным. Поэтому при расчетах в крупногабаритных каналах могут быть использованы методы прослеживания лучей и мнимых источников, реализующие зеркальную модель отражения, статистический энергетический метод, разработанный для расчетов при диффузном отражении звука, и их комбинации для расчетов при смешанном зеркально-диффузном характере отражения звука.

Выполненные исследования формирования звуковых полей указывают на зеркально-диффузный характер отражения звука от стенок канала [2]. По этой причине в канале кроме прямого звука образуется отраженное звуковое поле, включающее в себя зеркальную и диффузную составляющие. В этом случае при расчетах уровней звукового давления необходимо использовать комбинированный метод, в котором прямая и зеркально отраженная энергия определяются методом прослеживания лучей, а диффузно отраженная энергия – статистическим энергетическим методом. Методика решения задач комбинированным методом подробно рассмотрена в статье [3]. Используемый в этом случае статистический энергетический метод основан на математической модели, описывающей распределение диффузно отраженной энергии в квазидиффузных звуковых полях помещений. Следует отметить, что подобная модель в последнее время используется также и в зарубежной прак-

тике при расчетах шума в помещениях при диффузном отражении звука от ограждений [4–8].

Распределение диффузной составляющей отраженной энергии в канале имеет особенности. Выполненные в работе [9] экспериментальные исследования показывают, что диффузно отраженная звуковая энергия остается постоянной в поперечном сечении каналов. При этом происходят ее изменения по длине каналов. Это обстоятельство позволяет считать, что звуковое поле диффузно отраженной составляющей одномерно, и тем самым упростить методику расчетов уровней звукового давления комбинированным методом. Подобная методика подробно рассмотрена в статье [10]. Согласно предложенной методике, суммарный уровень звукового давления в расчетных точках канала вычисляется по формуле

$$L_i = 10 \lg [c (\varepsilon_i^{\text{пр}} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^{\text{д}}) / I_0], \quad (1)$$

где $\varepsilon_i^{\text{пр}}$, ε_i^3 , $\varepsilon_i^{\text{д}}$ – плотности прямой звуковой энергии, зеркальной и диффузно рассеянной составляющих отраженной энергии в i -й расчетной точке;

I_0 – пороговая интенсивность звука;

c – скорость звука.

Так как канал может иметь повороты, а звукопоглощающая облицовка располагается на отдельных участках, канал разделяется по длине на элементарные объемы и определяются узловые точки одномерной сетки (рис. 1).

Расчет уровней звукового давления производится в следующей последовательности: для каждой расчетной точки определяются плотности $\varepsilon_i^{\text{пр}}$ и ε_i^3 ; находятся величины диффузно отраженной энергии, вносимые при рассеянии отражаемых от поверхности зеркальных звуковых лучей; для всех объемов с учетом граничных условий записываются уравнения балансов диффузно отраженной энергии; производится решение полученной системы уравнений, в результате которого определяются величины $\varepsilon_i^{\text{д}}$; по формуле (1) находится суммарный уровень звукового давления.

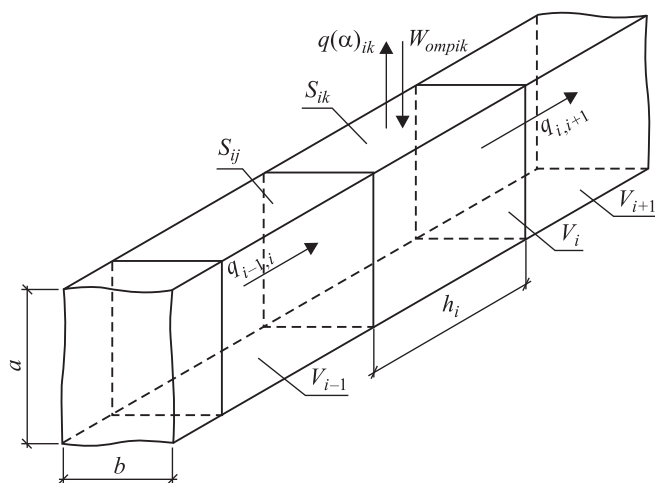


Рис. 1. Схема разбиения канала на элементарные объемы
 Fig. 1. The scheme of dividing the channel into elementary volumes

Расчет плотностей прямой и зеркально отраженной энергий в i -х расчетных точках производится методом прослеживания лучей по формулам:

$$\varepsilon_i^{\text{пр}} = \left[\sum_{K=1}^{K_{\text{пр}}} \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{в}} R_{ki\text{пр}}) \right] / cS_{\text{пр}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_i^{\text{з}} = \left\{ \sum_{K=1}^{K_{\text{з}}} \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{в}} R_{ki\text{з}}) \prod_{p=1}^P [(1-\alpha_p)(1-\beta_p)]^{D_p} \right\} / cS_{\text{пр}}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) W – мощность источника звука;

N – количество лучей, исходящих из источника звука;

$K_{\text{пр}}$ и $K_{\text{з}}$ – количество прямых и зеркальных лучей, прошедших через i -й объем канала;

$m_{\text{в}}$ – коэффициент затухания звука в воздухе;

$S_{\text{пр}}$ – приведенная площадь сечения элементарного объема канала, равная площади поперечного сечения сферы, равной по объему элементарному параллелепипеду канала;

R_{ki} – расстояние, проходимое k -м прямым лучом от источника звука до i -го элементарного объема, м;

α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности канала, на которую падает зеркальный прослеживаемый луч;

P – общее число актов отражения k -го луча от всех поверхностей канала, встречающихся на его пути в процессе распространения его на расстояние R_{ki} до i -го элементарного объема;

D_p – число актов падения k -го луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние R_{ki} ;

β_p – доля диффузно рассеянной энергии k -го луча после его отражения от p -й поверхности канала.

Расчет плотности диффузно отраженной энергии $\varepsilon_i^{\text{д}}$ в комбинированном методе производится численным методом [3], реализующим математическую модель, описывающую распределение плотности диффузной энергии в квазидиффузном звуковом поле в виде уравнения в частных производных второго порядка

$$\eta \nabla^2 \varepsilon^{\text{д}} - c m_a \varepsilon^{\text{д}} = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\bar{q} \Big|_{dS} = \beta(1-\alpha) I \Big|_{dS} - \frac{c\alpha}{2(2-\alpha)} \varepsilon^{\text{д}} \Big|_{dS}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) $\eta = 0,5c\bar{l}$ – коэффициент связи плотности потока и градиента плотности диффузно отраженной энергии в квазидиффузном звуковом поле [3];

\bar{l} – длина среднего свободного пробега звуковых лучей рассеянной звуковой энергии;

α, β – коэффициенты звукопоглощения и рассеяния зеркальной энергии на рассматриваемом элементе dS поверхности;

I – интенсивность прямой и отраженной зеркальной звуковой энергии с углом падения звуковых лучей, приходящих на элемент dS .

Первый член правой части граничных условий (5) определяет ввод диффузно рассеянной энергии в объем помещения с поверхности элемента dS при падении на него зеркальных лучей. Второй член определяет интенсивность поглощения диффузно рассеянной энергии, падающей на элемент dS .

В случае численного решения уравнения (4) с граничными условиями (5) для каждого элементарного объема канала (рис. 1) составляется уравнение баланса диффузно отраженной звуковой энергии. Общее распределение плотности диффузно отраженной энергии находится из решения полученной системы алгебраических уравнений.

Для элементарного объема канала баланс отраженной энергии записывается как

$$(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})S + \sum_{m=1}^M W_{mi}^{\Delta} - \sum_{m=1}^M q_{(\alpha)mi} S_{mi} - cm_{\text{в}} \varepsilon_i^{\Delta} V_i = 0. \quad (6)$$

Здесь $(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})$ – разность плотностей потоков энергии, входящих в i -й объем и выходящих через сечение $S = ab$;

$q_{(\alpha)mi}$ – плотность потока диффузно отраженной энергии, поглощаемой на m -й поверхности i -го объема, являющейся поверхностью канала с площадью S_{mi} ;

W_{mi}^{Δ} – диффузная энергия, поступающая в i -й объем после отражения зеркальных лучей от m -й поверхности i -го объема и перехода части их энергии в диффузную;

$V_i = abh$ – объем i -го элемента;

ε_i^{Δ} – плотность диффузно отраженной энергии в i -м объеме.

Потоки энергии $q_{i-1,i}$ и $q_{i,i+1}$ определяются как:

$$\begin{aligned} q_{i-1,i} &= -\eta(\varepsilon_{i-1}^{\Delta} - \varepsilon_i^{\Delta})/h_i; \\ q_{i,i+1} &= -\eta(\varepsilon_i^{\Delta} - \varepsilon_{i+1}^{\Delta})/h_i. \end{aligned} \quad (7)$$

Величина потоков $q_{(\alpha)mi}$ вычисляется по формуле

$$q_{(\alpha)mi} = \frac{\alpha_{mi} c \varepsilon_i^{\Delta}}{2(2 - \alpha_{mi})}, \quad (8)$$

где α_{mi} – коэффициент звукопоглощения m -й поверхности i -го объема.

Величина W_{mi}^{Δ} определяется суммой энергий прямых и зеркальных лучей, перешедших в отраженную диффузную составляющую при отражении лучей от m -й поверхности i -го объема, являющейся частью поверхности канала:

$$\begin{aligned} W_m^{\Delta} &= \beta_m (1 - \alpha_m) \left[\sum_{k=1}^{K_{\text{пр}}} \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{в}} R_{k_{i,j,d}}) \cos \theta_{m_{i,j,d}} + \right. \\ &\left. + \sum_{k=1}^{K_3} \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{в}} R_{k_{i,j,d}}) \cos \theta_{m_{i,j,d}} \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p)(1 - \beta_p)]^{D_p} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $K_{\text{пр}}$ – количество прямых и зеркально отраженных лучей, упавших на m -ю поверхность i -го объема канала, являющегося поверхностью ограждения канала;

β_m – доля диффузно рассеянной энергии k -го луча после его отражения от m -й поверхности ограждения i -го объема канала;

$\theta_{mi,j,d}$ – угол падения k -го луча на m -ю поверхность в i -м объеме.

Важное значение при использовании комбинированного метода имеет установление действительного соотношения между частями зеркально и диффузно отражаемой от стенок канала энергии. Нами ранее было установлено [2], что в металлических воздуховодах диффузно отражается только 5 % падающей на стенки зеркальной энергии. Это соотношение и рекомендуется использовать при расчетах комбинированным методом в воздуховодах с легкими металлическими стенками.

Для реализации метода разработана компьютерная программа расчета звуковых полей в крупногабаритных каналах и проектирования средств шумозащиты за счет устройств звукопоглощающих облицовок. Программа построена по модульному принципу, содержит модули по вычерчиванию воздуховода, заданию граничных условий и параметров источников звука. Обмен информацией между программными модулями осуществляется через унифицированную информационную систему.

С использованием компьютерной программы выполнена оценка эффективности различных вариантов устройства звукопоглощающих облицовок (ЗПО) внутри канала. Расчеты произведены для металлического канала квадратного поперечного сечения с размерами 1×1 м на частоте 1000 Гц. Такие параметры канала приняты с целью обеспечения возможности сравнения рассчитанных значений с данными из нормативной литературы. Длина участка канала составляла 31 м. Рассматривался канал с двумя поворотами по длине. Ранее выполненные исследования [2] показали, что на данной частоте металлические воздуховоды с гидравлическим диаметром 1 м имеют расчетный коэффициент звукопоглощения, равный 0,004. В качестве звукопоглощающего материала (ЗПМ) использовалось супертонкое стекловолокно, покрытое защитным материалом из стеклоткани. Коэффициент звукопоглощения такой конструкции на частоте 1000 Гц составляет 0,7.

Исследовалась акустическая эффективность размещения звукопоглощающих облицовок на поворотах канала. Повороты оказывают существенное влияние на изменение распространения звуковой энергии в канале. На поворотах возможно снижение уровня потока звуковой мощности на 5–7 дБ. При этом происходит резкое изменение структуры звукового поля. При удалении от источника шума в звуковом поле начинают превалировать осевые лучи. На повороте одна часть осевых лучей отражается, а другая часть распространяется далее в виде косых и касательных лучей, которые имеют гораздо более высокое погонное затухание. По этой причине ЗПО, располагаемая в зоне поворота канала, может обеспечить более высокую эффективность по сравнению с другими вариантами ее размещения.

Очевидно, что эффективность ЗПО в каналах с поворотом зависит от места ее размещения. По этой причине были выполнены расчеты уровней звукового давления в канале с двумя поворотами при четырех различных

ситуациях: 1 – канал без ЗПО; 2 – канал с ЗПО, установленными после поворотов; 3 – канал с ЗПО, установленными до поворотов; 4 – канал с ЗПО, установленными до и после поворотов.

Схемы размещения ЗПО в канале приведены на рис. 2. Размеры на схемах указаны в метрах.

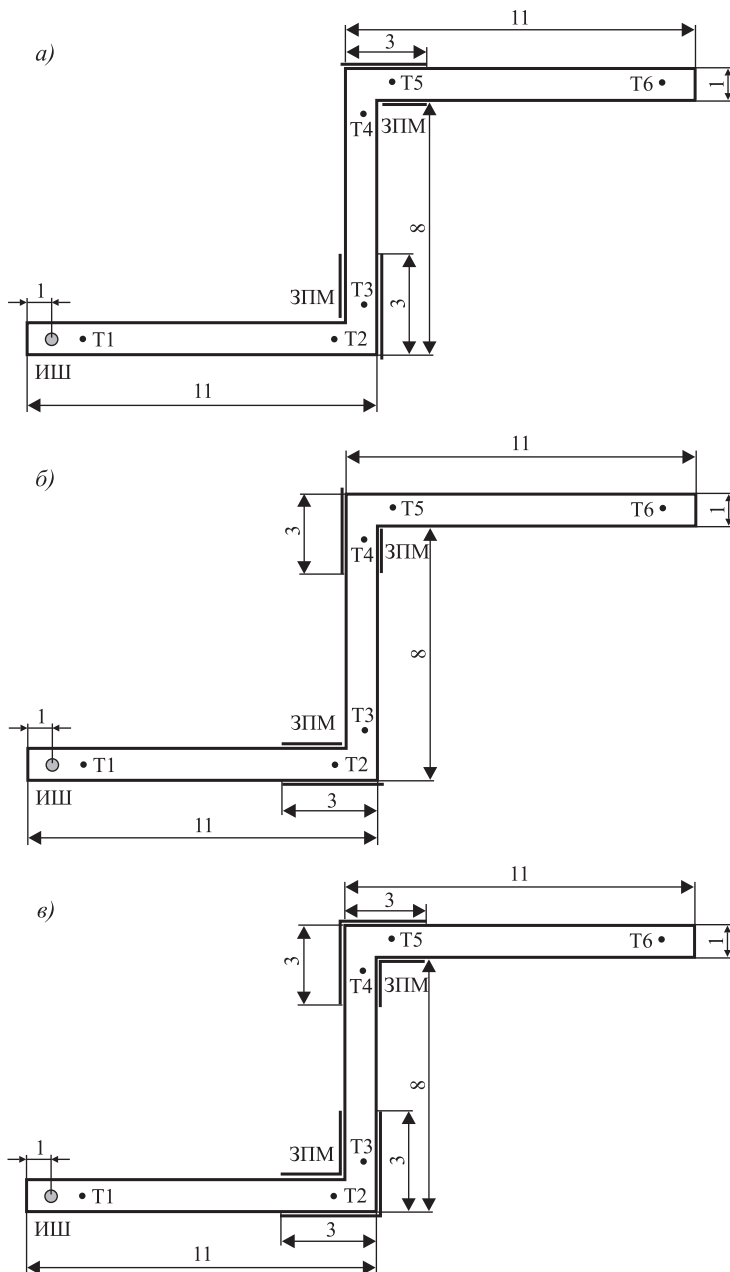


Рис. 2. Расчетные схемы установки ЗПО в канале
ИШ – источник шума; Т1–Т6 – расчетные точки; ЗПМ – участок воздуховода со звукопоглощающей облицовкой

Fig. 2. Desing schemes for installing the ZPO in the channel
ISh – noise source; Т1–Т6 – desing points; ZPM – duct section with sound-absorbing lining

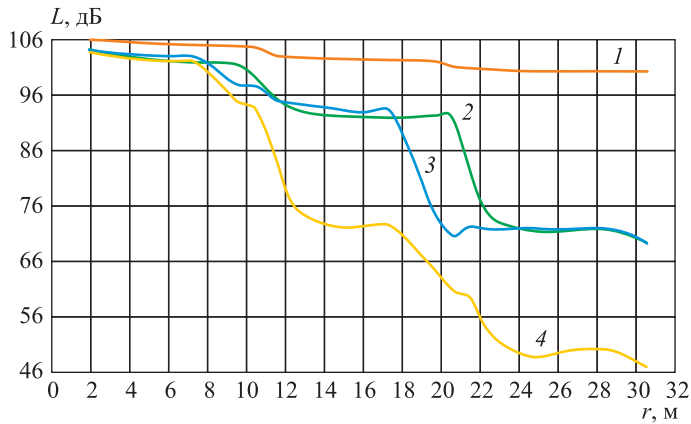


Рис. 3. Графики изменения уровней звуковой мощности при различных акустических параметрах канала с двумя поворотами

1 – без ЗПО; 2 – при ЗПО после поворотов; 3 – при ЗПО до поворотов; 4 – при ЗПО до и после поворотов

Fig. 3. Graphs of changes in sound power levels for different acoustic parameters of the channel with two turns

1 – without ZPO; 2 – with ZPO after turns; 3 – with ZPO before turns; 4 – with ZPO before and after turns

Полученные в результате расчетов графики изменения уровней звуковой мощности в канале для всех расчетных ситуаций приведены на рис. 3.

Подробнее анализ полученных расчетных данных приведен в таблице. Влияние поворота совместно со звукопоглощающей конструкцией оценивается разницей рассчитанных уровней звуковой мощности ΔL_y в точках Т2–Т3 и Т4–Т5. На участках воздуховода между точками Т1–Т2, Т3–Т4 и Т6–Т5 определялось влияние звукопоглощающей облицовки на погонный спад уровнем $\Delta L/\Delta r$.

Результаты выполненных расчетов показали высокую акустическую эффективность применения ЗПО. Из графиков рис. 3 и данных таблицы видно, что снижение шума при установке ЗПО до или после поворотов одинаково по величине. Разное расположение звукопоглощающей конструкции только сдвигает зону резкого изменения уровней звуковой мощности на 3 м, что хорошо соответствует изменению положения ЗПО (см. рис. 2, а, б). В целом эффективность снижения звуковой мощности при устройстве ЗПО до или после поворотов составила 30,5 дБ.

В случае размещения ЗПО до и после поворотов общее снижение звуковой мощности на участке от Т1 до Т6 составляет 53,5 дБ.

Сравнение полученных результатов с данными, приведенными в СП 271.1325800.2016 «Системы шумоглушения воздушного отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Правила проектирования», свидетельствует о значительном занижении эффективности звукопоглощающих облицовок в своде правил. Расхождения составляют 8 дБ при установке ЗПО до или после поворотов и соответственно 20 дБ при установке ЗПО до и после поворотов. Расхождения объясняются тем, что в методике свода правил не учитываются конкретные размеры ЗПО и их реальные коэффициенты звуко-

Сводная информация о параметрах звуковых полей в канале при отсутствии и наличии в нем звукопоглощающих облицовок

Summary information about the parameters of sound fields in the channel in the absence and presence of sound-absorbing facings in it

№ схемы расчета	Вид воздуховода	Параметр	Параметры звукового поля в расчетных точках на расстоянии r от источника шума					
			T1 $r = 1$ м	T2 $r = 8,5$ м	T3 $r = 10,5$ м	T4 $r = 18,5$ м	T5 $r = 20,5$ м	T6 $r = 30,5$ м
1	Без ЗПО	L , дБ	106,08	104,88	102,96	101,97	100,66	100,10
		ΔL_y , дБ		1,92		1,31		
		$\Delta L/\Delta r$, дБ/м	0,16		0,12		0,06	
2	ЗПО до поворотов	L , дБ	104,00	97,84	95,06	75,95	72,15	69,60
		ΔL_y , дБ		2,78		3,80		
		$\Delta L/\Delta r$, дБ/м	0,83		2,39		0,26	
	Эффективность	ΔL , дБ	2,08	7,04	7,90	16,02	28,51	30,50
3	ЗПО после поворотов	L , дБ	103,70	101,33	95,38	92,09	81,90	69,33
		ΔL_y , дБ		5,95		10,19		
		$\Delta L/\Delta r$, дБ/м	0,32		0,41		1,26	
	Эффективность	ΔL , дБ	2,38	3,55	7,58	9,88	18,76	30,77
4	ЗПО до и после поворотов	L , дБ	103,51	94,91	84,29	65,01	59,20	46,65
		ΔL_y , дБ		10,62		5,81		
		$\Delta L/\Delta r$, дБ/м	1,15		2,41		1,26	
	Эффективность	ΔL , дБ	2,57	9,97	18,67	36,96	41,46	53,45

поглощения, а также характер изменения спадов звуковой мощности на участках размещения ЗПО.

Таким образом, при проектировании звукопоглощающих облицовок внутри каналов в процессе выбора мест их размещения, определения размеров и необходимых коэффициентов звукопоглощения облицовок следует использовать предложенный метод расчета.

Заключение. Выполненные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Эффективным средством снижения звуковой энергии, распространяющейся в газоздушных каналах и излучаемой через их устья, является устройство звукопоглощающих облицовок. Особенно эффективно их размещение в местах поворотов каналов.

2. Методика оценки снижения звуковой мощности в каналах за счет устройства звукопоглощающих облицовок, приведенная в действующем своде правил, не учитывает параметры облицовок и их акустические характеристики. По этой причине она может давать значения, существенно отличающиеся от реальных значений снижения звуковой мощности в каналах со звукопоглощающими облицовками.

3. Для оценки реальной эффективности снижения звуковой мощности в каналах за счет устройства звукопоглощающих облицовок следует использовать предложенный в настоящей работе метод расчета, учитывающий зеркально-диффузный характер отражения звука от стенок канала.

Список источников

1. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И., Матвеева И.В. Расчет шума газозвдушных систем ТЭЦ при оценке их шумового воздействия на застройку // *Жилищ. стр-во*. 2019. № 7. С. 47.
2. Гусев В.П., Леденев В.И., Антонов А.И., Матвеева И.В. Расчеты распространения звуковой энергии в крупногабаритных металлических воздуховодах прямоугольного сечения // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сб. науч. тр. РААСН: В 2 т. Т. 2. М.: Рос. акад. архитектуры и строит. наук (РААСН), 2021. С. 52–60.*
3. 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. No. 1. С. 13–22.
4. Foy C., Valeau V., Picaut J., Fortin N., Sakout A., Prax C. Modeling the inhomogeneous reverberant sound field within the acoustic diffusion model: a statistical approach // *J. Acoust. Soc. Am*. 2017. Vol. 141, no. 5. P. 3931.
5. Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J. Experimental analysis of the relationship between reverberant acoustic intensity and energy density inside long rooms // *J. Acoust. Soc. Am*. 2015. Vol. 138, no. 1. P. 181–192.
6. Foy C., Picaut J., Valeau V. Including scattering within the room acoustics diffusion model: an analytical approach // *J. Acoust. Soc. Am*. 2016. Vol. 140, no. 4. P. 2659–2669.
7. Foy C., Picaut J., Valeau V. Including the wall scattering coefficient in the diffusion model for building acoustics // *INTER NOISE*. 2015. 11 p.
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.
9. Солодова М.А., Соломатин Е.О. Экспериментальные исследования шума в аналоге крупногабаритных воздушных каналов // *Вестн. МГСУ*. 2011. № 3-1. С. 97–102.
10. Жоголева О.А., Жоголев С.А., Соломатин Е.О. Расчет шума при проектировании звукоизоляции газозвдушных каналов (современная теория и практика) // *Вестн. Вологод. гос. ун-та. Серия: Техн. науки*. 2018. № 2. С. 63–66.

References

1. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Calculation of the noise of gas-air systems of thermal power plants when assessing their noise impact on the building. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing construction*. 2019; (7): 47. (In Russ.).
2. Gusev V.P., Ledenev V.I., Antonov A.I., Matveeva I.V. Calculations of sound energy propagation in large-sized rectangular metal ducts. Fundamental, exploratory and applied research of the RAACS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020. Collection of scientific papers of the RAACS: In 2 vol. Vol. 2. Moscow: Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), 2021. P. 52–60. (In Russ.).

3. *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): 13–22.
4. *Foy C., Valeau V., Picaut J., Fortin N., Sakout A., Prax C.* Modeling the inhomogeneous reverberant sound field within the acoustic diffusion model: a statistical approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 2017; 141(5): 3931.
5. *Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J.* Experimental analysis of the relationship between reverberant acoustic intensity and energy density inside long rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015; 138(1): 181–192.
6. *Foy C., Picaut J., Valeau V.* Including scattering within the room acoustics diffusion model: an analytical approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 2016; 140(4): 2659–2669.
7. *Foy C., Picaut J., Valeau V.* Including the wall scattering coefficient in the diffusion model for building acoustics. *INTER NOISE*. 2015. 11 p.
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.
9. *Solodova M.A., Solomatin E.O.* Experimental studies of noise in the analogue of large-sized air channels. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2011; (3-1): 97–102. (In Russ.).
10. *Zhogoleva O.A., Zhogolev S.A., Solomatin E.O.* Noise calculation in the design of sound insulation of gas-air channels (modern theory and practice). *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki = Bulletin of the Volgograd State University. Series: Technical Sciences*. 2018; (2): 63–66. (In Russ.).

Информация об авторах

А.И. Антонов – доктор технических наук, доцент

В.П. Гусев – доктор технических наук

В.И. Леденев – доктор технических наук, профессор

И.В. Матвеева – кандидат технических наук, доцент

Information about the authors

A.I. Antonov – DSc, Ass. Professor

V.P. Gusev – DSc

V.I. Ledenev – DSc, Professor

I.V. Matveeva – PhD, Ass. Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021
Одобрена после рецензирования 26.10.2021
Принята к публикации 29.10.2021

The article was submitted 23.09.2021
Approved after reviewing 26.10.2021
Accepted for publication 29.10.2021