



УДК 628.517.2

А. И. АНТОНОВ, д-р техн. наук, проф. кафедры архитектуры зданий и градостроительства¹, вед. науч. сотр.²; **А. В. ГРЕЧИШКИН**³, канд. техн. наук, зав. кафедрой городского строительства и архитектуры; **В. П. ГУСЕВ**², д-р техн. наук, глав. науч. сотр.; **В. И. ЛЕДЕНЕВ**, д-р техн. наук, проф. кафедры городского строительства и автомобильных дорог¹, вед. науч. сотр.²; **И. В. МАТВЕЕВА**¹, канд. техн. наук, доц. кафедры городского строительства и автомобильных дорог

СНИЖЕНИЕ ШУМА ГАЗОВОЗДУШНЫХ КАНАЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩИМИ ОБЛИЦОВКАМИ

¹ФГБОУ 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@mail.tambov.ru.

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»

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

³ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28. Тел.: (8412) 48-27-37

Ключевые слова: газозвудушные каналы, шум, звукоизолирующие облицовки, расчеты звукоизоляции, энергетические предприятия.

Рассматривается методика проектирования звукоизоляции газозвудушных каналов, излучающих звуковую энергию в окружающую среду. На основании исследований, выполненных авторами статьи, предлагается алгоритм проектирования дополнительной звукоизоляции газозвудушных каналов, учитывающий изменение звукоизоляции облицовок каналов путем варьирования состава облицовок, а также изменения геометрических параметров и акустических характеристик материалов слоев облицовок.

На территориях современных городов имеется большое количество предприятий, создающих неблагоприятную шумовую обстановку в прилегающей к ним застройке. В крупных мегаполисах к ним в первую очередь относятся энергетические объекты [1, 2]. Среди большого количества источников шума, имеющих на энергетических предприятиях, особое место занимают газозвудушные тракты [3]. Излучение ими шума происходит как через устья, так и через стенки каналов.

Для снижения шума, излучаемого устьями каналов, в настоящее время используются различного вида глушители, устанавливаемые непосредственно в каналах или перед ними у открытых концов воздухопроводов [3].

Так как газозвудушные тракты имеют большие поперечные размеры и большую протяженность, звуковая энергия, излучаемая через стенки каналов, приводит к зашумлению значительных участков, прилегающих к энергетическим объектам территорий. Для снижения звуковой энергии, излучаемой стенками каналов, необходимо устраивать на них звукоизолирующие облицовки. Выбор конструктивных решений звукоизолирующих облицовок и материалов для их устройства является сложной задачей, требующей выполнения нескольких операций, следующих друг за другом. Например, при выборе материалов для устройства звукоизолирующих облицовок необходимо решать три задачи, а именно:

- выполнять расчет звуковой энергии, распространяющейся от источника шума внутри пространства канала;



- определять требуемую звукоизоляцию стенок канала;
- производить расчет звукоизоляции дополнительной облицовки канала, принимая различные звукоизоляционные материалы.

Как видно из перечисленных задач, вначале следует производить расчеты распространения шума внутри каналов. При выборе метода расчета необходимо учитывать особенности его распространения в каналах как в длинных помещениях. Газовоздушные тракты энергетических объектов относятся к крупногабаритным каналам, размеры которых существенно превышают длины распространяющихся звуковых волн практически во всем нормируемом диапазоне частот. Выполненные исследования распространения шума в крупногабаритных каналах показывают, что уровни шума в них определяются прямой и отраженной звуковой энергией. При этом отраженная энергия включает в себя зеркальную и диффузную составляющие [4, 5]. Расчет отраженной энергии в этом случае следует производить комбинированным методом, в котором зеркальная составляющая определяется методом прослеживания лучей, а диффузная – статистическим энергетическим методом [4]. В настоящее время комбинированный метод используется нами при решении практических задач по проектированию звукопоглощающих и звукоизолирующих облицовок крупногабаритных каналов газовоздушных трактов различного назначения [6].

В статье рассмотрена методика по проектированию звукоизолирующих облицовок газовоздушных каналов, которая использует комбинированный метод расчета составляющих прямого и отраженного звука, распространяющихся в пространстве канала.

Проектирование дополнительной звукоизоляции стенок канала в этом случае включает в себя ряд последовательных операций:

- на основе комбинированного метода производится определение уровней звукового давления в расчетных точках канала. Методика расчета подробно изложена в статье [4];
- определяется интенсивность звуковой энергии, падающей изнутри на стенки канала. Методика определения интенсивности приведена в статье [6];
- на основе сведений о допустимых уровнях звукового давления в расчетных точках окружающего воздуховод пространства и расчетных формул для определения в этих точках уровней звукового давления, создаваемых излучаемой каналом звуковой энергии, определяется требуемая звукоизоляция стенок канала $R_{тр}$ во всем нормируемом диапазоне частот. Расчетные формулы для определения $R_{тр}$ стенок канала с квадратным поперечным сечением приведены в статье [6];
- на основе полученной частотной характеристики $R_{тр}$ производится оценка фактической звукоизоляции стенок канала и в случае ее несоответствия выполняется проектирование дополнительной звукоизоляции.

Так как стенки каналов в большинстве случаев выполняются из листовой стали, их звукоизоляция, как правило, недостаточна для обеспечения требуемых значений $R_{тр}$ и, соответственно, необходимо устройство дополнительных звукоизолирующих облицовок.

Для оценки звукоизолирующих характеристик облицовок предложено использовать численный метод прослеживания плоских звуковых волн, распространяющихся в элементах облицовки. Подробно численный метод для случая устройства на канале многослойных облицовок рассмотрен нами в статье [7], в которой также предложена упрощенная практическая формула, учитывающая только первую проникающую через облицовки волну. Формула для этого случая имеет вид:



$$R = 10 \lg \left(\frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right) + 8,69 \left(\sum_{i=1}^M \gamma' d_i \right) - 20 \lg \left(\tau_{M,в} \prod_{i=1}^{M-1} \tau_{i,i+1} \right), \quad (1)$$

где $\rho_0 c_0 = 430 \text{ кг/м}^2\text{с}$ – волновое сопротивление воздуха; $\rho_1 c_1$ – волновое сопротивление материалов 1-го слоя облицовки; ρ_i и c_i – объемная плотность материала i -го слоя облицовки и скорость звука в нем; d_i – толщина i -го слоя облицовки; $\gamma' i$ – действительная часть постоянной распространения волн для i -го слоя; M – количество слоев облицовки; $\tau_{i,i+1}$ – коэффициенты проницаемости между слоями; $\tau_{M,в}$ – то же между последним слоем и воздухом внешней среды.

В статье [7] показано, что формула (1) справедлива, если выполняется условие, когда:

$$\sum_{i=1}^M \gamma' d_i \gg 2. \quad (2)$$

В случае однослойной облицовки формула (1) имеет вид

$$R = 10 \lg \left(\frac{\rho_0 c_0}{\rho c} \right) + 8,69 \gamma' d - 20 \lg \left(\frac{2}{z+1} \right), \quad (3)$$

где z – относительный характеристический импеданс облицовки.

Из выражений (1)–(3) видно, что эффективность звукоизоляции облицовок зависит от поглощающих свойств материалов и их толщин. Следовательно, ее можно регулировать за счет соответствующего выбора материалов слоев облицовок, варьируя при этом их толщинами и последовательностью расположения слоев в пределах дополнительной облицовки. В статье [8] показано такое возможное изменение звукоизолирующих свойств облицовок при применении в них в качестве отдельных слоев из материалов *K-FONIK* и *K-Flex* при различных сочетаниях их толщин. В статье [9] дан подробный анализ влияния расположения (последовательности) слоев различных материалов на звукоизолирующие качества покрытий. Показано, что, например, изменение положения менее плотного материала *K-Flex ST* ($h = 25 \text{ мм}$, $\gamma = 45 \text{ кг/м}^3$) и более плотного материала *K-Flex GK* ($h = 2 \text{ мм}$, $\gamma = 2000 \text{ кг/м}^3$) может приводить к изменению эффективности звукоизоляции на 6–10 дБ. Указано, что при сохранении толщины плотного материала *K-Flex GK* и увеличении толщины легкого слоя, поглощающего звуковую энергию волн, проходящих через облицовку, приводит к росту эффективности звукоизоляции облицовки на средних и высоких частотах. В то же время на низких частотах это приводит к обратному эффекту. При исследованиях установлено, что частотная характеристика звукоизоляции канала может существенно изменяться при замене одного звукопоглощающего материала, контактирующего с поверхностью основного материала канала, на материал с другими звукопоглощающими характеристиками. Правильно подобранные характеристики первого от стенок канала слоя могут существенно повысить эффективность облицовки в низкочастотном диапазоне при сохранении при этом высокой эффективности звукоизоляции многослойной облицовки в целом [9].

Для оценки точности предложенного метода нами выполнен сравнительный анализ расчетных и измеренных значений дополнительной звукоизоляции стенок воздуховода. Результаты анализа приведены в статье [10]. Рассматривалась облицовка из пористого звукоизолирующего материала *Flex-ST*.

Ниже в качестве примера в табл. 1 и на рис. 1 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 1

Рассчитанные значения звукоизоляции облицовки воздуховода по первой проникающей волне

Частота звука, Гц	Звукоизоляция облицовки, дБ, при толщине облицовки, см				$\overline{\Delta L}$, дБ
	2,5	5,0	7,5	10,0	
125	0,54/-0,8	0,87/1,3	1,19/4,1	1,52/3,2	2,7
250	0,94/-0,8	1,72/-3,7	2,5/-1,1	3,29/0,6	2,0
500	-0,67/-1,3	0,61/1,2	1,92/-0,8	3,22/-3,0	1,8
1000	2,3/+1,8	5,58/-0,4	8,84/0,3	12,1/-0,5	1,0
2000	3,8/-1,0	11,0/-0,8	18,3/-0,4	25,6/-0,1	0,7
$\overline{\Delta L}$, дБ	1,2	1,9	1,9	2,0	1,8

Примечание. В знаменателе дроби указаны расхождения между рассчитанной и измеренной звукоизоляцией.

В табл. 1 $\overline{\Delta L}$ – величина среднеквадратичного отклонения, определяемая по формуле

$$\overline{\Delta L} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta L_i)^2}, \quad (4)$$

где ΔL_i – расхождение между расчетными и экспериментальными данными, дБ; N – количество сравнений расчетных и экспериментальных данных.

Из результатов, приведенных в табл. 1 и на рис. 1, видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в области высоких частот. В то же время на низких частотах заметно проявляется интерференция звуковых волн. В результате в данном диапазоне частот наблюдаются провалы или повышения звукоизоляции.

В целом результаты сравнения показали, что предложенные формулы расчета дают возможность целенаправленного проектирования звукоизолирующих облицовок из различных материалов при различных сочетаниях толщин облицовок.

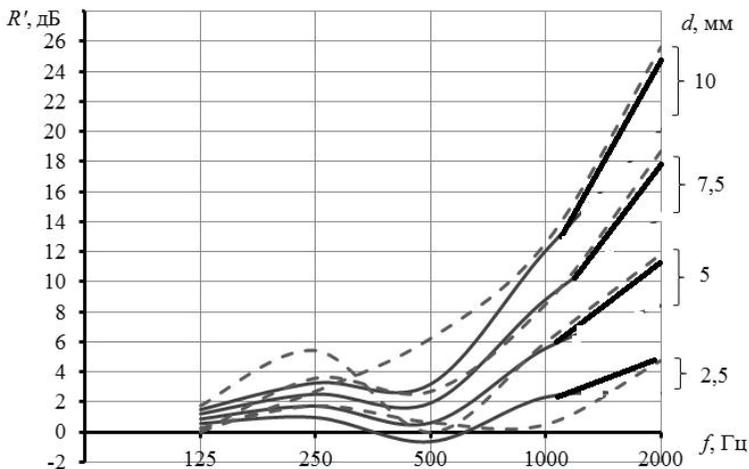


Рис. 1. Уровни звукоизоляции облицовки: измеренные (---) и рассчитанные (—) по первой проникающей волне



К настоящему времени в лаборатории защиты от шума вентиляционного и технологического оборудования НИИСФ РААСН выполнены серии исследований звукоизолирующих покрытий из материалов отечественных производителей. Рассматривались покрытия из легких вспененных и фольгированных волокнистых материалов, из различных эластомеров на основе каучука, а также из пеностекла. Результаты исследований приведены и проанализированы в статьях [11, 12, 13]. На основе этих результатов показана акустическая эффективность и определены границы применения исследованных материалов в качестве звукоизолирующих облицовок каналов газоздушных трактов.

В целом результаты выполненных нами исследований и их анализ показывают, что в настоящее время разработана эффективная методика проектирования звукоизолирующих облицовок газоздушных каналов, дающая возможность обеспечения защиты территории застройки от шума, излучаемого газоздушными системами энергетических объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Защита жилой застройки от шума расширенной по мощности ТЭЦ Москвы / В. П. Гусев, А. В. Сидорина, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 6 (1042). – С. 10–12.
2. Оценка шумового воздействия развитой по мощности ТЭЦ на жилую застройку / В. П. Гусев, А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2021. – № 2 (34). – С. 123–137.
3. Расчет шума газоздушных систем ТЭЦ при оценке их шумового воздействия на застройку / В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Жилищное строительство. – 2019. – № 7. – С. 47–51.
4. Метод оценки распространения шума по воздушным каналам систем отопления, вентиляции и кондиционирования / В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 52–54.
5. Антонов, А. И. Влияние характера отражения звука от ограждений на выбор метода расчета воздушного шума в гражданских и промышленных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, О. О. Федорова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2017. – № 2 (42). – С. 16–23.
6. Гусев, В. П. Компьютерный расчет уровней шума при проектировании крупногабаритных газоздушных каналов / В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 6 (982). – С. 15–17.
7. Расчет дополнительной звукоизоляции воздухопроводов при устройстве на них многослойных облицовок / В. П. Гусев, А. В. Сидорина, А. И. Антонов, В. И. Леденев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 3(375). – С. 202–207.
8. Проектирование звукоизоляции крупногабаритных вентиляционных каналов / В. П. Гусев, А. В. Сидорина, А. И. Антонов, В. И. Леденев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2017. – № 2 (368). – С. 254–260.
9. Гусев, В. П. Акустические исследования звукоизолирующих покрытий на трубопроводы воздушных и газовых систем / В. П. Гусев, А. В. Сидорина // Строительные материалы. – 2017. – № 6. – С. 59–62.
10. Антонов, А. И. Сравнительный анализ расчетных и измеренных значений дополнительной звукоизоляции воздухопроводов из пористого материала Flex-ST / А. И. Антонов, В. И. Леденев, В. П. Гусев // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 4(78). – С. 76–83.
11. Гусев, В. П. Изоляция шума воздухопроводов систем вентиляции покрытиями с использованием эластомерных и волокнистых материалов / В. П. Гусев, А. В. Сидорина //



Строительные материалы. – 2013. – № 6. – С. 37–39.

12. Гусев, В. П. Акустические характеристики покрытий на воздухопроводы и технологические трубы / В. П. Гусев, А. В. Сидорина // Строительные материалы. – 2015. – № 6. – С. 35–38.

13. Акустические и динамические характеристики эластомерных строительных материалов на основе NBR-каучука / В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, А. В. Сидорина // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 56–61.

ANTONOV Aleksandr Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the department of architecture and building construction¹; leading researcher²; GRECHISHKIN Alexander Viktorovich³, candidate of technical sciences, head of the department of urban development and architecture; GUSEV Vladimir Petrovich, doctor of technical sciences, chief scientific officer; LEDENEV Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the department of urban development and road¹; leading researcher²; MATVEEVA Irina Vladimirovna¹, candidate of technical sciences, associate professor of the department of urban development and road

NOISE REDUCTION OF GAS-AIR CHANNELS OF ENERGY

¹Tambov 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

²Research Institute of Building Physics RAASN

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

³Penza State University of Architecture and Construction

28, Herman Titov St., Penza, 440028, Russia. Tel.: +7 (8412) 48-27-37

Key words: gas-air channels, noise, sound-proofing cladding, sound insulation calculations, energy companies.

The method of designing sound insulation of gas-air channels emitting sound energy into their environment is considered. Based on the research carried out by the authors of the article, an algorithm for designing additional sound insulation of gas-air channels is proposed, taking into account the change in the sound insulation of channel linings by varying the composition of the linings, as well as changes in the geometric parameters and acoustic characteristics of the materials of the lining layers.

REFERENCES

1. Gusev V. P., Sidorina A. V., Ledenev V. I., Matveeva I. V. Zashchita zhiloy zastrojki ot shuma rasshirenoy po moshchnosti TEC Moskvy [Protection of residential buildings from the noise of Moscow's expanded thermal power plant] / V. P. Gusev // BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction equipment]. – 2021. – № 6 (1042). – P. 10–12.

2. Gusev V. P., Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V. Ocenka shumovogo vozdejstviya razvitoj po moshchnosti TEC na zhiluyu zastrojku [Assessment of the noise impact of a developed thermal power plant on residential buildings] // Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii [Biosphere compatibility: person, region, technology]. – 2021. – № 2 (34). – P. 123–137.

3. Gusev V. P., ZHogoleva O. A., Ledenev V. I., Matveeva I. V. Raschet shuma gazovozdushnyh sistem TEC pri ocenke ih shumovogo vozdejstviya na zastrojku [Calculation of the noise of gas-air systems of thermal power plants when assessing their noise impact on the building] // ZHilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. – 2019. – № 7. – P. 47–51.

4. Gusev V. P., ZHogoleva O. A., Ledenev V. I., Solomatin E. O. Metod ocenki rasprostraneniya shuma po vozdushnym kanaliam sistem otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniya [A method for assessing the propagation of noise through the air channels of heating, ventilation and air



- conditioning systems] // ZHilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. – 2012. – № 6. – P. 52–54.
5. Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V., Fedorova O. O. Vliyanie haraktera otrazheniya zvuka ot ograzhdenij na vybor metoda rascheta vozdušnogo shuma v grazhdanskih i promyshlennyh zdaniyah [Influence of the nature of sound reflection from fences on the choice of method for calculating air noise in civil and industrial buildings] // Privolzhsckij nauchnyj zhurnal [Privolzhsky scientific journal]. – 2017. – № 2 (42). – P. 16–23.
6. Gusev V. P., ZHogoleva O. A., Ledenev V. I. Komp'yuternyj raschet urovnej shuma pri proektirovanii krupnogabaritnyh gazovozdushnyh kanalov [Computer calculation of noise levels in the design of large-sized gas-air channels] // BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction equipment]. – 2016. – № 6 (982). – P. 15–17.
7. Gusev V. P., Sidorina A.V., Antonov A. I., Ledenev V. I. Raschet dopolnitel'noj zvukoizolyacii vozduhovodov pri ustrojstve na nih mnogoslojnyh oblicovok [Calculation of additional sound insulation of air ducts when installing multilayer linings on them] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti [News of higher educational institutions. Textile industry technology]. – 2018. – № 3 (375). – P. 202–207.
8. Gusev V. P., Sidorina A.V., Antonov A. I., Ledenev V. I. Proektirovanie zvukoizolyacii krupnogabaritnyh ventilyacionnyh kanalov [Design of sound insulation of large-sized ventilation ducts] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti [News of higher educational institutions. Textile industry technology]. – 2017. – № 2 (368). – P. 254–260.
9. Gusev V. P., Sidorina A. V. Akusticheskie issledovaniya zvukoizoliruyushchih pokrytij na truboprovody vozdušnyh i gazovyh sistem [Acoustic studies of sound-proofing coatings on pipelines of air and gas systems] // Stroitel'nye materialy [Building materials]. – 2017. – № 6. – P. 59–62.
10. Antonov A. I., Ledenev V. I., Gusev V. P. Sravnitel'nyj analiz raschetnyh i izmerennyh znachenij dopolnitel'noj zvukoizolyacii vozduhovodov iz poristogo materiala Flex-ST [Comparative analysis of calculated and measured values of additional sound insulation of air ducts made of porous Flex-ST material] // Stroitel'stvo i rekonstrukciya [Construction and reconstruction]. – 2018. – № 4 (78). – P. 76–83.
11. Gusev V. P., Sidorina A. V. Izolyaciya shuma vozduhovodov sistem ventilyacii pokrytiami s ispol'zovaniem elastomernyh i voloknistyh materialov [Noise isolation of air ducts of ventilation systems by coatings using elastomeric and fibrous materials] // Stroitel'nye materialy [Building materials]. – 2013. – № 6. – P. 37–39.
12. Gusev V. P., Sidorina A. V. Akusticheskie karakteristiki pokrytij na vozduhovody i tekhnologicheskie truby [Acoustic characteristics of coatings for air ducts and process pipes] // Stroitel'nye materialy [Building materials]. – 2015. – № 6. – P. 35–38.
13. Gusev V. P., ZHogoleva O. A., Ledenev V. I., Sidorina A. V. Akusticheskie i dinamicheskie karakteristiki elastomernyh stroitel'nyh materialov na osnove NBR-kauchuka [Acoustic and dynamic characteristics of elastomeric building materials based on NBR rubber] // Stroitel'nye materialy [Building materials]. – 2018. – № 6. – P. 56–61.

© А. И. Антонов, А. В. Гречишкин, В. П. Гусев, В. И. Леднев, И. В. Матвеева, 2022

Получено: 26.02.2022 г.