

УДК 628.517.2

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ**

**DESIGNING OF SOUND INSULATION
OF LARGE-SIZED VENTILATION CHANNELS**

*В.П. ГУСЕВ, А.В. СИДОРИНА, А.И. АНТОНОВ, В.И. ЛЕДЕНЕВ
V.P. GUSEV, A.V. SIDORINA, A.I. ANTONOV, V.I. LEDENEV*

**(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
Тамбовский государственный технический университет)
(Tambov State Technical University,**

**Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru**

Шум, распространяющийся по крупногабаритным вентиляционным каналам, проникает через их ограждения и негативно воздействует на окружающую их среду. Для защиты от него необходимо проектирование стенок каналов как звукоизолирующих конструкций, исходя из уровней шума, возникающего внутри каналов, и требований к шумовому режиму в окружающей их среде. В статье рассмотрены методы расчета шума внутри каналов и в

окружающей их среде, принципы определения требуемой звукоизоляции стенок каналов и ее практического обеспечения.

Noise, spreading through large ventilation ducts, penetrates through their fences and adversely affects their environment. To protect against it, it is necessary to design the channel walls as sound-insulating structures, based on the noise levels occurring within the channels and the noise regime requirements in their environment. In the article methods of calculation of noise inside channels and in their environment are considered, principles of definition of required sound insulation of channel walls and its practical support.

Ключевые слова: вентиляционный канал, распространение звуковой энергии, расчет уровней шума, звукоизоляция стенок канала.

Keywords: ventilation duct, sound energy distribution, calculation of noise levels, soundproofing of the channel walls.

Крупногабаритные, преимущественно прямоугольные вентиляционные каналы применяют в вентиляционных системах промышленных объектов, включая объекты текстильной промышленности. По этим, как правило, транзитным каналам распространяется повышенный шум, возникающий в них при работе мощных вентиляторов. Когда звукоизоляция стенок каналов недостаточна, шум проникает через них в окружающее пространство. Для защиты от этого шума при проектировании каналов необходимы сведения об их требуемой звукоизоляции.

Для получения этих сведений вначале при известной мощности источника шума необходимо найти распределение внутри канала звуковой энергии и затем определить ее интенсивность, падающую на внутренние поверхности канала. Зная эту интенсивность и допустимые уровни звукового давления защищаемой от шума зоны помещения или на прилегающей к каналу территории, можно вычислить требуемые величины звукоизоляции стенок канала.

Для оценки распространения звуковой энергии в каналах можно использовать метод, предложенный в работе [1]. Метод основан на комбинированной расчетной модели, в которой в отличие от других расчетных моделей, например, от модели, рассмотренной в [2], зеркальная и рассеянная составляющие отраженной энергии определяются раздельно [3]. В этом случае сум-

марный уровень звукового давления в i -й точке канала вычисляется по формуле:

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

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости; c – скорость звука; ε_i^{pp} , ε_i^3 , ε_i^d – плотности прямой звуковой энергии, зеркальной и рассеянной составляющих отраженной энергии.

Для определения плотностей прямой и зеркально отраженной энергий использован метод прослеживания лучей, а для диффузно отраженной энергии – статистический энергетический метод.

Известно, что распределение диффузно отраженной звуковой энергии в каналах одномерное [4]. В этом случае методика расчета шума в канале комбинированным методом включает следующие основные операции: канал разбивается на элементарные объемы со сторонами a , b и h (рис. 1) и определяются узловые точки одномерной сетки; для каждой точки определяются плотности ε_i^{pp} и ε_i^3 ; находятся величины диффузно отраженной энергии, вносимые при рассеянии отражаемых от поверхности звуковых лучей; для всех объемов записываются уравнения балансов диффузной отраженной энергии с учетом граничных условий; осуществляется решение полученной системы уравнений, в результате

которого определяются величины ϵ_i^{Δ} ; находится суммарная плотность энергии по формуле (1).

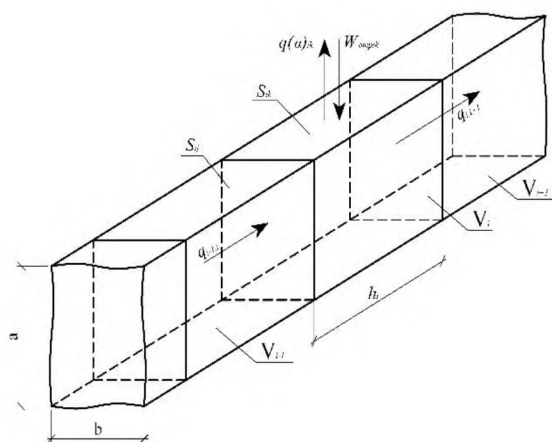


Рис. 1

При расчете энергии прямого звука методом прослеживания лучей звуковая мощность, переносимая каждым k -м лучом, от места излучения до i -й расчетной точки канала составляет:

$$W_{ki}^{np} = \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{ki}), \quad (2)$$

плотность прямой энергии в i -м объеме определяется по формуле:

$$\epsilon_i^{np} = \sum_{k=1}^{K_{np}} W_{ki}^{np} / cS_{np}. \quad (3)$$

Звуковая мощность k -х зеркально отраженных лучей находится по формуле:

$$W_{ki}^3 = \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{ki}) \prod_{p=1}^P [(1-\alpha_p)\xi_p]^{D_p} \quad (4)$$

и ее плотность определяется как

$$\epsilon_i^3 = \sum_{k=1}^{K_3} W_{ki}^3 / cS_{np}. \quad (5)$$

В формулах (2)...(5): W – звуковая мощность источника, Вт; N – количество лучей, исходящих из источника; m_b – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m^{-1} ; R_{ki} – расстояние, проходимое k -м лучом от источника звука до i -го элементарного объема, м; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал k -й луч; P – общее число актов отражения k -го луча от всех поверхностей, встречающихся при распространении его на расстояние R_{ki} до i -го объема; D_p – число актов падения k -го луча на p -ю поверхность при распространении его на расстояние R_{ki} ; ξ_p – доля энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от p -й поверхности; S_{np} – приведенная площадь сечения элементарного объема, равная площади поперечного сечения сферы, заменяющей этот объем; K_{np} , K_3 – количество лучей прямого звука и зеркально отраженных лучей, прошедших через i -й объем.

Плотность диффузно отраженной энергии ϵ_i^{Δ} определяется численным статистическим энергетическим методом [5]. Суть его заключается в составлении уравнений баланса диффузно отраженной энергии для каждого объема канала и последующего решения системы уравнений.

Для i -го элементарного объема уравнение записывается как

$$(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})S + \sum_{m=1}^4 W_{mi}^{\Delta} - \sum_{m=1}^4 q_{(\alpha)mi} S_{mi} - cm_b \epsilon_i^{\Delta} V_i = 0. \quad (6)$$

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 энер-

гии в диффузную; $V_i = abh$ – объем i -го элемента; ε_i^D – плотность диффузно отраженной энергии в i -м объеме.

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

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

где $\eta = 0,5c\ell_{cp}$ – коэффициент связи плотности потока и градиента плотности в квазидиффузном звуковом поле [5]; ℓ_{cp} – длина среднего пробега звуковых лучей в канале.

Величина потоков $q(\alpha)_{mi}$ вычисляется по формуле:

$$q(\alpha)_{mi} = \frac{\alpha_{mi} c \varepsilon_i^D}{2(2 - \alpha_{mi})}, \quad (8)$$

$$I_{\text{пад}i}^{\text{пр}} = \left(\sum_{m=1}^M \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{mi}) \cos \theta_{mi} \right) / S_{mi}, \quad (10)$$

$$I_{\text{пад}i}^3 = \left(\sum_{m=1}^M \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{mi}) \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p) \xi_p]^D \cos \theta_{mi} \right) / S_{mi}. \quad (11)$$

Интенсивность диффузно отраженной энергии вычисляется по формуле:

$$I_{\text{пад}i}^D = \varepsilon_i^D c / 2(2 - \alpha_{mi}). \quad (12)$$

В формулах (10)...(12): M – количество прямых или зеркально отраженных лучей, падающих на поверхность S_{mi} стенки канала i -го объема; θ_{mi} – угол между падающим на стенку m -м лучом и нормалью к стенке в i -м объеме.

Суммарная падающая интенсивность звуковой энергии $I_{\text{пад}i}^{\text{сум}}$ и интенсивность энергии, излучаемой с поверхности канала в окружающую среду $I_{\text{из}i}$, равны:

$$I_{\text{пад}i}^{\text{сум}} = I_{\text{пад}i}^{\text{пр}} + I_{\text{пад}i}^3 + I_{\text{пад}i}^D, \quad I_{\text{из}i} = I_{\text{пад}i}^{\text{сум}} \tau, \quad (13)$$

где τ – коэффициент звукопроницаемости стенок канала.

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

Величина W_m^D определяется по формуле:

$$W_m^D = (1 - \alpha_{mi})(1 - \xi_{mi}) \left(\sum_{k=1}^{K_s} W_{ki}^3 + \sum_{k=1}^{K_{\text{пр}}} W_{ki}^{\text{пр}} \right), \quad (9)$$

где ξ_{mi} – доля зеркальной энергии, направляемая по лучу после его отражения от m -й поверхности.

Оценка точности метода выполнена в работе [1].

Величины интенсивностей падающих на стенки канала прямой и зеркально отраженной энергий определяются по формулам:

При известной интенсивности $I_{\text{из}i}$ проводится расчет распространения звуковой энергии от канала как от линейного источника шума. Так как каналы имеют сечения, близкие к квадрату, интенсивность излучаемой с их поверхностей звуковой энергии может быть принята одинаковой по всем граням. В канале с сечением $a \times a$ погонная мощность излучения с каждой стенки составляет $p' = I_{\text{из}i} a$, Вт/м. Поскольку по длине канала величина p переменная, при расчете длина канала разделяется на участки, в пределах которых мощность принимается равной средней мощности участка $p'_{\text{ср}} = a I_{\text{пад}i}^{\text{сум}} \tau$.

Ниже дана формула для определения плотности звуковой энергии в расчетных точках окружающей канал среды для участка канала, представленного на рис. 2 (схема к расчету прямого звука от квадратного канала).

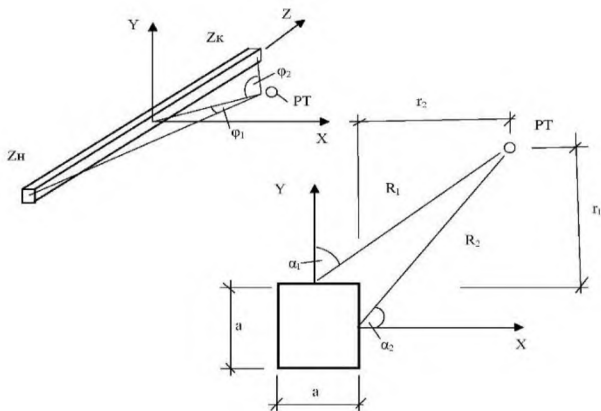


Рис. 2

Так как в расчетную точку (рис. 2) энергия приходит от двух граней канала, плотность

$$L_i = 10 \lg \sum_{i=1}^N \frac{a I_{\text{падср}i}^{\text{сум}}}{\pi R_i I_0} (\cos \alpha_{1i} + \cos \alpha_{2i}) (\sin \phi_{2i} - \sin \phi_{1i}) + 10 \lg \tau. \quad (15)$$

При известном допустимом уровне звукового давления в расчетной точке $L_{\text{доп}}$ мо-

$$R_{\text{тр}} = 10 \lg \sum_{i=1}^N \frac{a I_{\text{падср}i}^{\text{сум}}}{\pi R_i I_0} (\cos \alpha_{1i} + \cos \alpha_{2i}) (\sin \phi_{2i} - \sin \phi_{1i}) - L_{\text{доп}}. \quad (16)$$

Выполнив расчет $R_{\text{тр}}$ во всех октавных полосах частот, можно получить частотную характеристику требуемой звукоизоляции и на ее основе спроектировать стенки канала.

Звукоизоляция каналов обеспечивается их стенками и устройством на них дополнительных покрытий. Стенки могут выполняться из различных материалов, в том числе и из металлических листов. Повышение звукоизоляции металлических стенок каналов возможно при применении вибродемпфированных листовых элементов, состоящих из двух листов с внутренним вибродемпфирующим слоем [6]. Такое решение повышает звукоизоляцию без увеличения поверхностной плотности стенок. Покрытия стенок могут выполняться из волокнистых и эластомерных материалов. Покрытия из волокнистых и легких вспененных полиэтиленовых материалов име-

ность ее в расчетной точке от участка канала с координатами z_n и z_k будет определяться по формуле:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i} = \frac{P_{\text{ср}}}{\pi c R} (\cos \alpha_{1i} + \cos \alpha_{2i}) (\sin \phi_{2i} - \sin \phi_{1i}), \quad (14)$$

где ε_{1i} и ε_{2i} – плотности энергий, пришедших в i -ю расчетную точку от верхней и боковой грани.

Уровень звукового давления в расчетной точке от всех участков канала определяется по формуле:

жет быть найдена величина требуемой звукоизоляции стенок канала:

ют невысокие звукоизолирующие качества, особенно на низких и средних частотах. Лучшими качествами обладают эластомеры типа K-FONIK. Об этом свидетельствуют акустические испытания покрытий каналов диаметрами от 100 до 400 мм [7...9].

На рис. 3 в качестве примера показана акустическая эффективность комбинированных многослойных покрытий канала диаметром 400 мм (1 – K-Flex ST (25мм); 2 – K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм); 3 – K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм) + K-Flex ST (25мм); 4 – K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм) + K-Flex ST (25мм) K-FONIK GK (2 мм); 5 – K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм) + K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм) + K-Flex ST (25мм); 6 – K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм) + K-Flex ST (25мм) + K-FONIK GK (2 мм)).

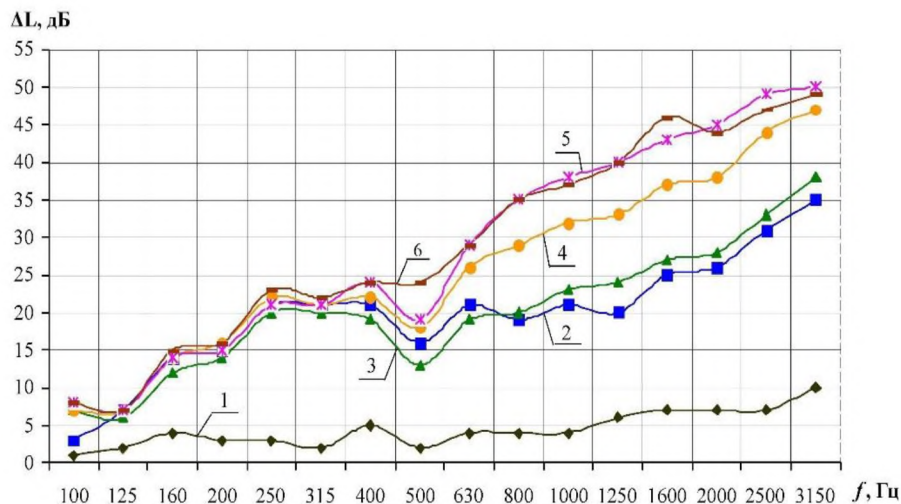


Рис. 3

Благодаря высоким акустическим характеристикам такие покрытия нашли применение при защите от шума круглых и прямоугольных воздуховодов систем вентиляции и трубопроводов систем холодоснабжения в зданиях различного назначения. В последнее время покрытия на основе материалов типа K-FONIK используются и в системах газоснабжения. Пример такого применения дан в работе [10]. В ней подробно показан практический опыт повышения звукоизоляции газопроводов диаметром 400...700 мм, размещаемых в помещении газораспределительной станции.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика расчета требуемой звукоизоляции стенок крупногабаритных вентиляционных каналов и ее компьютерная реализация позволяют надежно определять звукоизоляционные характеристики ограждений каналов.

2. Методика и компьютерная программа используются в настоящее время при решении практических задач по проектированию крупногабаритных каналов прямоугольного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Метод оценки распространения шума по воздушным каналам систем отопления, вентиляции и кондиционирования // Жилищное строительство. – 2012, №6. С.52...54.

2. Гусев В.П., Леденев В.И., Матвеева И.В. Метод оценки распространения шума в крупногабаритных газозвуковых трактах энергетических объектов // Academia. Архитектура и строительство. – 2009, №5. С.104...107.

3. Гусев В.П., Леденев В.И., Солодова М.А., Соломатин Е.О. Комбинированный метод расчета уровней шума в крупногабаритных газозвуковых каналах // Вестник МГСУ. – 2011, №3-1. С.33...38.

4. Солодова М.А., Соломатин Е.О. Экспериментальные исследования шума в аналоге крупногабаритных воздушных каналов // Вестник МГСУ. – 2011, №3-1. С.97...102.

5. Антонов А.И., Леденев В.И., Жданов А.Е. Статистические энергетические методы расчета отраженных шумовых полей помещений // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2003, Т.9, №4. С.713...717.

6. Кочкин А.А. Легкие звукоизолирующие ограждающие конструкции из элементов с вибродемпфирующими слоями // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. – 2011, №5-2(38). С.152...156.

7. Гусев В.П., Сидорина А.В. Изоляция шума воздуховодов систем вентиляции покрытиями с использованием эластомерных и волокнистых материалов // Строительные материалы. – 2013, №6. С.37...39.

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

9. Гусев В.П., Лешко М.Ю. Защита от шума вентиляционного оборудования кожухами и звукоизолирующими покрытиями // БСТ. – 2016, №6. С.12...14.

10. Лешко М.Ю., Сидорина А.В. Защита жилой застройки от шумового воздействия газораспределительных станций // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №4. С.152...156.

REFERENCES

1. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Solomatin E.O. Metod ocenki rasprostraneniya shuma po vozdušnym kanalam sistem otopenija, ventiljacii i kondicionirovanija // *Zhilishhnoe stroitel'stvo*. – 2012, №6. S.52...54.
2. Gusev V.P., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Metod ocenki rasprostraneniya shuma v krupnogabaritnyh gazovozdušnyh traktah jenerge-tičeskij ob'ektov // *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. – 2009, №5. S.104...107.
3. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solodova M.A., Solomatin E.O. Kombinirovannyj metod rasčeta urovnej shuma v krupnogabaritnyh gazovozdušnyh kanalach // *Vestnik MGSU*. – 2011, №3-1. S.33...38.
4. Solodova M.A., Solomatin E.O. Jeksperimental'nye issledovanija shuma v analoge krupno-gabaritnyh vozdušnyh kanalov // *Vestnik MGSU*. – 2011, №3-1. S.97...102.
5. Antonov A.I., Ledenev V.I., Zhdanov A.E. Statističeskie jenergetičeskie metody rasčeta otrazhennyh šumovyh polej pomeshhenij // *Vestnik Tambovskogo gos. tehn. un-ta*. – 2003, T.9, №4. S.713...717.
6. Kochkin A.A. Legkie zvukoizolirujushhie ograzhdajushhie konstrukcii iz jelementov s vibrodempfirujushhimi slojami // *Izv. Jugo-Zapadnogo gos. un-ta*. – 2011, №5-2(38). S.152...156.
7. Gusev V.P., Sidorina A.V. Izoljacija shuma vozduhovodov sistem ventiljacii pokrytijami s ispol'zovaniem jelastomernyh i voloknistyh materialov // *Stroitel'nye materialy*. – 2013, №6. S.37...39.
8. Gusev V.P., Sidorina A.V. Akustičeskie harakteristiki pokrytij na vozduhovody i tehnologičeskie truby // *Stroitel'nye materialy*. – 2015, №6. S.35...38.
9. Gusev V.P., Leshko M.Ju. Zashhita ot shuma ventiljacionnogo oborudovanija kozhuhami i zvukoizolirujushhimi pokrytijami // *BST*. – 2016, №6. S.12...14.
10. Leshko M.Ju., Sidorina A.V. Zashhita žilobj zastrojki ot šumovogo vozdejstvija gazoraspreditel'nyh stancij // *Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyšlennosti*. – 2016, № 4. S. 152...156.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ
РААСН. Поступила 03.04.17.