

РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУХОВОДОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ НА НИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБЛИЦОВОК

CALCULATION OF ADDITIONAL SOUND INSULATION OF AIR DUCTS WITH MULTILAYERED LINING ON THEM

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)
(Research Institute of Building Physics
of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Tambov State Technical University)
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Воздуховоды различного назначения, располагаемые в зданиях и на территориях промышленных предприятий, являются источниками повышенного шума. Для уменьшения его воздействия на воздуховодах устраиваются звукоизолирующие облицовки. В последнее время среди них широкое распространение получили многослойные конструкции, состоящие из слоев различных материалов. Для оценки возникающей при устройстве облицовок дополнительной звукоизоляции необходимо иметь метод ее расчета, учитывающий различные факторы, влияющие на ее величину. В статье предлагается методика расчета дополнительной звукоизоляции облицованных воздуховодов, учитывающая влияние на нее характеристик материалов слоев, их толщину, взаимное расположение и другие параметры облицовок.

Ducts of various purposes, located in buildings and industrial areas, are sources of increased noise. To reduce its impact on air ducts, soundproofing lining is arranged. Recently, among them, multilayer structures consisting of layers of various materials have been widely used. In order to assess the additional soundproofing that occurs when installing the liners, it is necessary to have a method for calculating it, taking into account various factors that affect its size. The article proposes a technique for calculating the additional sound insulation of the lined ducts, taking into account the influence of the material characteristics of the layers on them, their thickness, mutual arrangement and other parameters of the lining.

Ключевые слова: воздуховод, шум, звукоизолирующие облицовки, расчет звукоизоляции, промышленные предприятия.

Keywords: air duct, noise, soundproof cladding, calculation of sound insulation, industrial enterprises.

Воздуховоды различного назначения, размещаемые на промышленных предприятиях, в том числе и текстильной промышленности, как правило, являются источниками повышенного шума [1], [2]. Распространяющийся внутри воздуховода шум, проникает через его стенки в смежные по-

мещения и создает в них неблагоприятный шумовой режим [3]. В настоящее время нами разработаны методы расчета шума, распространяющегося внутри воздуховодов [4...6]. Зная величину уровней звукового давления внутри его и нормативные уровни звукового давления в расчетных

точках, можно определить требуемую звукоизоляцию воздуховода [7].

Как показывает практика, обеспечить требуемую звукоизоляцию только за счет звукоизоляции стенок воздуховода не удастся. Поэтому на наружных поверхностях воздуховодов производится устройство звукоизолирующих облицовок [8]. Сейчас для этого начинают использоваться конструкции покрытий, состоящие из слоев различных материалов [9...12]. Выполненные экспериментальные исследования показали высокую эффективность таких покрытий [10]. Однако для проектирования оптимальных по акустическим параметрам многослойных облицовок необходимо иметь метод расчета дополнительной звукоизоляции, позволяющий оценивать влияние на нее характеристик материалов различных слоев, их толщину и взаимное расположение.

Анализ имеющихся методов расчета звукоизоляции показывает, что для этих целей возможно использование аналитических методов [13...15]. Однако трудоемкость их использования является высокой и особенно применительно к многослойным конструкциям. Методы сложно использовать при многофакторном анализе влияния на дополнительную звукоизоляцию акустических и конструктивных параметров облицовок. В то же время современные компьютерные технологии позволяют применять для оценки звукоизоляции прямой численный метод расчета звукового поля в облицовках посредством прослеживания отдельных плоских звуковых волн с учетом

процессов их отражения, проницаемости на границах слоев облицовки и затухания в пределах каждого слоя.

В настоящей статье дается методика расчета дополнительной звукоизоляции воздуховодов за счет устройства многослойных облицовок. В методике используется численный метод прослеживания прохождения плоских звуковых волн через облицовку, учитывающий их распространение в пределах слоев облицовки, отражения на границах слоев, проницаемости через границы слоев и затухания. Методика рассматривается на примере расчета звукоизоляции двухслойной облицовки. Она может также применяться и при расчетах для облицовок с произвольным количеством слоев.

Схема к расчету дополнительной звукоизоляции двухслойной конструкции облицовки методом прослеживания звуковых волн приведена на рис. 1. Как видно из рис. 1, в каждом слое облицовки будут распространяться плоские волны попутного и встречного направления. В пределах i -го слоя уравнение звукового давления плоской волны имеет вид:

$$P_i = \bar{P}_i e^{-\gamma_i x} = \bar{P}_i e^{-(\gamma'_i + j\gamma''_i)x}, \quad (1)$$

где \bar{P}_i – комплексная амплитуда волны на входе в слой; $\gamma_i = \gamma'_i + j\gamma''_i$ – комплексная величина постоянной распространения для i -го слоя; x – локальная в пределах i -го слоя система координат.

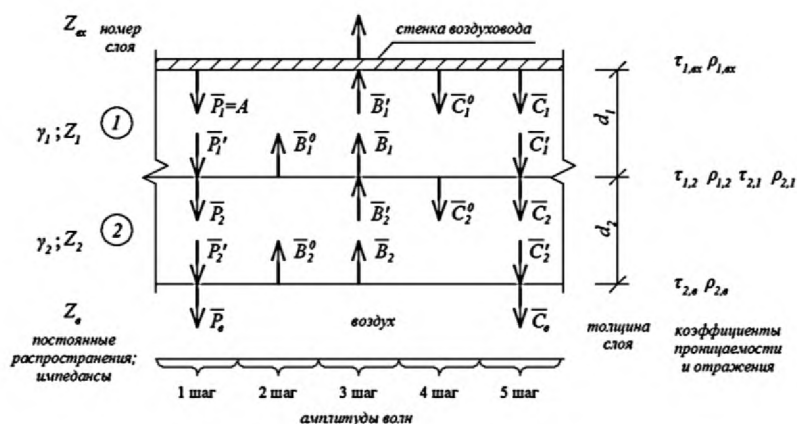


Рис. 1

Для сокращения записи зависимость колебания от времени за счет фактора $e^{-j\omega t}$ опускается. Круговая частота определяется мнимой составляющей постоянной распространения $\omega = \gamma_i''/c_i$, где c_i – скорость звука в материале слоя облицовки. Амплитуда волны в пределах i -го слоя, вследствие поглощения, уменьшается и после прохождения слоя равна:

$$\bar{P}'_i = \bar{P}_i e^{-\gamma_i d_i}, \quad (2)$$

где d_i – толщина i -го слоя.

Для расчета звукового поля облицовки необходимо знать параметры звуковой волны на границах слоев облицовки. Расчет их может выполняться пошагово.

Шаг 1. Рассчитывается прямая звуковая волна, проходящая через облицовку. Для этого задается амплитуда колебания поверхности первого слоя облицовки в зоне его контакта с воздуховодом $\bar{P}_1 = A$, где A – заданная амплитуда колебаний, передающихся от колеблющейся стенки воздуховода к материалу первого слоя облицовки. На границу между слоями 1 и 2 согласно выражению (2) приходит плоская волна с амплитудой:

$$\bar{P}'_1 = \bar{P}_1 e^{-\gamma_1 d_1}. \quad (3)$$

В слое 2 амплитуды звукового давления на входе и на выходе из него соответственно равны:

$$\bar{P}_2 = \bar{P}'_1 \tau_{1,2}, \quad \bar{P}'_2 = \bar{P}_2 e^{-\gamma_2 d_2}, \quad (4)$$

где $\tau_{1,2}$ – коэффициент проходимости на границе между 1 и 2 слоями.

Коэффициенты проходимости (прозрачности) определяются на основе выражений:

$$\begin{aligned} \tau_{i,i+1} &= \frac{2Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}}, \\ \tau_{i+1,i} &= \frac{2Z_i}{Z_i + Z_{i+1}}, \quad \tau_{i,i+1} \neq \tau_{i+1,i}, \end{aligned} \quad (5)$$

где Z_i – характеристический импеданс среды i -го слоя. В общем случае γ_i и Z_i , а также коэффициенты τ являются комплексными величинами.

Через конструкцию облицовки пройдет прямая плоская волна с амплитудой:

$$\bar{P}_B = \bar{P}'_2 \tau_{2,B}, \quad (6)$$

где $\tau_{2,B}$ – коэффициент проходимости границы слоя 2 и внешней воздушной среды.

Величина амплитуды \bar{P}_B имеет важное значение при анализе процессов передачи звука через облицовку и при расчете звукоизоляции конструкции. В общем случае для амплитуд проходящей прямой волны через облицовку, состоящую из M слоев, можно записать выражение:

$$\bar{P}_B = A \tau_{M,B} \exp\left(-\sum_{i=1}^M \gamma_i d_i\right) \prod_{i=1}^{M-1} \tau_{i,i+1}. \quad (7)$$

При высоких поглощающих свойствах слоев облицовки выполняется неравенство:

$$\sum_{i=1}^M \gamma_i' d_i > 2. \quad (8)$$

В этом случае прошедшая через облицовку первая волна \bar{P}_B будет характеризовать звукоизолирующие свойства конструкции в целом. Коэффициент проходимости по энергии τ' и уровень звукоизоляции R , дБ, облицовки по первой прошедшей волне определяются так:

$$\tau' = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \left| \frac{\bar{P}_B}{A} \right|^2, \quad (9)$$

$$R = 10 \lg\left(\frac{1}{\tau'}\right) = 10 \lg\left(\frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \left| \frac{A}{\bar{P}_B} \right|^2\right), \quad (10)$$

где $\rho_0 c_0 = 430 \text{ кг/м}^2\text{с}$ – волновое сопротивление воздуха; $\rho_1 c_1$ – волновое сопротивление материала слоя 1 облицовки.

После подстановки в (9) величины \bar{P}_B , определяемой выражением (7), формула для определения τ' имеет вид:

$$\tau' = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \left[\tau_{M,B} \exp \left(- \sum_{i=1}^M \gamma_i d_i \right) \prod_{i=1}^{M-1} \tau_{i,i+1} \right]^2, \quad (11)$$

$$R = 10 \lg \left(\frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right) + 8,69 \left(\sum_{i=1}^M \gamma_i d_i \right) - 20 \lg \left(\tau_{M,B} \prod_{i=1}^{M-1} \tau_{i,i+1} \right). \quad (12)$$

Выражение (12) является приближенным, так как учитывает только первую проходящую волну. Однако в соответствии с неравенством (8) можно определить диапазон характеристик материала облицовки, при которых первая, проходящая через нее, волна с достаточной точностью будет определять общие звукоизолирующие свойства облицовки.

Шаг 2. Осуществляется учет отраженных волн на границах слоев и их влияние на звукоизоляцию.

Отраженные волны V_i^0 показаны на схеме рис. 1. Их значения определяются выражениями:

$$\bar{V}_1^0 = \bar{P}'_1 \rho_{1,2}, \quad \bar{V}_2^0 = \bar{P}'_2 \rho_{2,B}. \quad (13)$$

Коэффициенты отражения рассчитываются в зависимости от импедансов слоев:

$$\begin{aligned} \rho_{i,i+1} &= \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i}, \\ \rho_{i,i+1} &= -\rho_{i+1,i}, \\ \rho_{i,i+1} &= \tau_{i,i+1} - 1. \end{aligned} \quad (14)$$

Шаг 3. В случае недостаточно высокого поглощения энергии в облицовке отраженные ("обратные") волны будут наслаиваться. Общие отраженные волны \bar{V}_i в этом случае будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 &= \bar{V}_2^0, \quad \bar{V}'_2 = \bar{V}_2 e^{-\gamma_2 d_2}, \\ \bar{V}_1 &= \bar{V}_1^0 + \bar{V}'_2 \tau_{2,1}, \quad \bar{V}'_1 = \bar{V}_1 e^{-\gamma_1 d_1}. \end{aligned} \quad (15)$$

и соответственно расчет звукоизоляции облицовки воздуховода будет производиться по формуле:

На следующих этапах (шаг 4, 5 и т.д.) рассчитываются характеристики волн \bar{C}_i^0 и \bar{C}_i как результат отражения волн \bar{V}_i . Расчет величин \bar{C}_i производится по выражениям, аналогичным (13) и (14). На каждом этапе рассчитывается суммарная амплитуда $\bar{P}_{\Sigma B}$ прошедших через облицовку звуковых волн и устанавливаются коэффициенты звукопроницаемости:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\Sigma B} &= \bar{P}_B + \bar{C}_B + \dots \\ \tau' &= \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \left[\frac{\bar{P}_{\Sigma B}}{A} \right]^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Расчет выполняется до тех пор, пока суммарная амплитуда волн стабилизируется и ее колебания относительно среднего значения будут меньше установленной точности расчета.

Для расчета звуковых полей методом прослеживания звуковых волн разработана компьютерная программа. Ниже приведен пример расчета звукоизоляции двухслойной облицовки из слоя Flex-ST толщиной 25 мм и слоя Fonik – толщиной 6 мм на частоте 125 Гц. Вводимые акустические характеристики слоев и рассчитанные коэффициенты проницаемости, отражения волн на границах слоев и затухания в пределах каждого слоя облицовки приведены на рис. 2 (начальная форма программы с исходными данными и с результатами расчета параметров слоев).

Расчет звукоизоляции облицовки воздуховода										
125 частота					45 глоты 1 слое					
43 скор звука в Голлх					Проницаемость					
Пост. Распространения					Отражение					
Импеданс					Затухание в слое					
номер	толщина	заглубл	фаза	акт	реакт	1-внеш	акт.	реакт.	акт.	реакт.
среда 1				10000	0	2-внеш	1,785	-0,018	0,785	-0,018
слой 1	5	0,015	0,058	6,63	0,62	3-внеш	0,036	0,000	-0,964	0,000
слой 2	0,06	0	0,13629958	55	0	1-внеш	1,999	0,000	0,999	0,000
среда 2					1	2-внеш	0,215	0,018	-0,785	0,018
						3-внеш	1,964	0,000	0,964	0,000

Рис. 2

На рис. 3 (подробная информация об амплитудах звуковых волн в двухслойной облицовке воздуховода) приведена подробная информация об амплитудах звуковых волн. Амплитуда волны на границе первого слоя облицовки и трубопровода принята равной 1000. Для каждой амплитуды приводятся реальная и мнимая составляющие. На частоте 125 Гц звукоизоляция облицовки составляет 4,5 дБ.

номер поперечности	Амплитуды волн и направления их движения							
	1 проходная	1 обратная	2 отраж.	2 обратная	3 отраж.	3 обратная	4 отраж.	4 обратная
1-к трубе	1000,0	558,9	0,0	217,3	0,0	-235,2	0,0	
1к 1 слою	1000,0	0,0	280,2	-221,4	279,8	-221,2	-173,9	7,8
2-к 1 слою	889,0	-263,3	357,6	-342,3	350,0	-270,8	382,0	-45,6
2к 2 слою	150,8	-489,4	-151,3	506,0	1513,5	-911,0	-913,3	911,0
3к 2 слою	15,6,2	-507,1	-1519,9	489,0	1503,2	-927,9	-949,5	894,8
3к воздухов.	26,3	-14,1	0,0	0,0	53,7	-33,1	0,0	0,0
модель-й волны	29,1			63,1	121,3		37,8	158,4
уровень	23,0			12,5	6,8		16,9	4,5
Общий уровень	157,7							25,9
Звуконедб	4,5							3,8

Рис. 3

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов расчета звукового поля численным методом с данными, полученными аналитическими методами, показало совпадение результатов. При этом предложенный метод прослеживания отдельных звуковых волн обладает неоспоримыми преимуществами. При его использовании становится доступной информация, важная для анализа звукового поля и получения оптимальных проектных решений. Например, прослеживая разности фаз различных волн, возможно обнаружить эффекты их взаимного гашения (приход волн в противофазе) или усиление (разность фаз кратна 2π или равна нулю). Благодаря этому можно выявить резервы и обеспечить увеличение звукоизоляции за счет изменения параметров звукоизолирующих слоев.

1. Гусев В.П., Леденев В.И. Проектирование оптимальной защиты от шумового воздействия систем ОВК в административных зданиях предприятий текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 146...152.

2. Гусев В.П., Леденев В.И., Шубин И.Л. Оптимальная защита окружающей среды от шумового воздействия оборудования систем ОВК // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2014, № 3 (7). С. 32...42.

3. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И. Проектирование шумозащиты в зданиях с подвесными потолками технологического назначения // Строительство и реконструкция. – 2017, № 3 (71). С.49...57.

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

5. Гусев В.П., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Энергетический метод оценки распространения шума в газозвудушных трактах // Academia. Архитектура и строительство. – 2010, № 3. С. 230...233.

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

7. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И. Компьютерный расчет уровней шума при проектировании крупногабаритных газозвудушных каналов // Бюллетень строительной техники. – 2016, № 6 (982). С. 15...17.

8. Гусев В.П., Лешко М.Ю., Сидорина А.В. Защита от воздушного шума вентиляционного оборудования кожухами и звукоизолирующими покрытиями // Бюллетень строительной техники. – 2016, № 6 (982). С. 12...14.

9. Гусев В.П., Сидорина А.В., Антонов А.И., Леденев В.И. Проектирование звукоизоляции крупногабаритных вентиляционных каналов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2 (368). С. 254...260.

10. Гусев В.П., Сидорина А.В. Акустические исследования звукоизолирующих покрытий на трубопроводах воздушных и газовых систем // Строительные материалы. – 2017, № 6. С. 59...62.

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

12. Гусев В.П., Сидорина А.В. Изоляция шума воздуховодов систем вентиляции покрытиями с использованием эластомерных и волокнистых материалов // Строительные материалы. – 2013, № 6. С.37...40.

13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973.

14. *Tartakovskij B.D.* Критерии распространения плоских волн через однородные слои. – ДАН СССР, 1950.

15. *Crook A.W.* The reflection and transmission of light by any system of parallel isotropic tiems // *J. Opt. Soc. Am.* – Vol. 38, №11, 1948. P. 954.

REFERENCES

1. Gusev V.P., Ledenev V.I. Proektirovanie optimalnoj zashity ot shumovogo vozdejstviya sistem OVK v administrativnyh zdaniyah predpriyatij tekstilnoj i legkoj promyshlennosti // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti.* – 2016, № 4. S. 146...152.

2. Gusev V.P., Ledenev V.I., Shubin I.L. Optimalnaya zashita okruzhayushej sredy ot shumovogo vozdejstviya oborudovaniya sistem OVK // *Biosfernaya sovmestimost: chelovek, region, tehnologii.* – 2014, №3 (7). S. 32...42.

3. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. Proektirovanie shumozashity v zdaniyah s podvesnymi potolkami tehnologicheskogo naznacheniya // *Stroitelstvo i rekonstrukciya.* – 2017, № 3 (71). S. 49...57.

4. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solodova M.A., Solomatina E.O. Kombinirovannyj metod rascheta urovnej shuma v krupnogabaritnyh gazovozdushnyh kanalakh // *Vestnik MGSU.* – 2011, № 3-1. S. 33...38.

5. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solomatina E.O. Energeticheskij metod ocenki rasprostraneniya shuma v gazovozdushnyh traktah // *Academia. Arhitektura i stroitelstvo.* – 2010, № 3. S. 230...233.

6. Gusev V.P., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Metod ocenki rasprostraneniya shuma v krupnogabaritnyh gazovozdushnyh traktah energeticheskikh obektov // *Academia. Arhitektura i stroitelstvo.* – 2009, № 5. S.104...107.

7. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. Kompyuternyj raschet urovnej shuma pri proektirovanii krupnogabaritnyh gazovozdushnyh kanalov // *Byulleten stroitelnoj tehniki.* – 2016, № 6 (982). S. 15...17.

8. Gusev V.P., Leshko M.Yu., Sidorina A.V. Zashita ot vozdušnogo shuma ventilyacionnogo oborudovaniya kozhuhami i zvukoizoliruyushimi pokrytiami // *Byulleten stroitelnoj tehniki.* – 2016, №6 (982). S. 12...14.

9. Gusev V.P., Sidorina A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I. Proektirovanie zvukoizolyacii krupnogabaritnyh ventilyacionnyh kanalov // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti.* – 2017, № 2 (368). S.254...260.

10. Gusev V.P., Sidorina A.V. Akusticheskie issledovaniya zvukoizoliruyushih pokrytij na truboprovody vozdušnyh i gazovyh sistem // *Stroitelnye materialy.* – 2017, № 6. S. 59...62.

11. Gusev V.P., Sidorina A.V. Akusticheskie karakteristiki pokrytij na vozduhovody i tehnologicheskie trubyy // *Stroitelnye materialy.* – 2015, № 6. S. 35...38.

12. Gusev V.P., Sidorina A.V. Izolyaciya shuma vozduhovodov sistem ventilyacii pokrytiami s ispolzovaniem elastomernyh i voloknistyh materialov // *Stroitelnye materialy.* – 2013, № 6. S. 37...40.

13. Brehovskih L.M. *Volny v sloistyh sredah.* – M.: Nauka, 1973.

14. *Tartakovskij B.D.* Критерии распространения плоских волн через однородные слои. – ДАН СССР, 1950.

15. *Crook A.W.* The reflection and transmission of light by any system of parallel isotropic tiems // *J. Opt. Soc. Am.* – Vol. 38, №11, 1948. P. 954.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 18.06.18.