



**О.А. Жоголева, С.А. Жоголев, Е.О. Соломатин**  
Тамбовский государственный технический университет

## РАСЧЕТ ШУМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ КАНАЛОВ (СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА)

В статье рассматривается опыт расчета шума в крупногабаритных газозвудушных каналах. Показаны особенности формирования шума внутри каналов, связанные с их геометрическими и акустическими параметрами. Рассмотрены методы расчета, разработанные авторами с учетом характера отражения звука от внутренних поверхностей стенок каналов.

Газозвудушный канал, распространение звуковой энергии, расчет уровней шума, отражение звука от ограждений.

В современных больших по объемам гражданских зданиях жилого и общественного назначения широкое распространение находят системы вентиляции и кондиционирования воздуха с центральными крупногабаритными газозвудушными каналами. В процессе эксплуатации по этим каналам происходит распространение звуковой энергии, возникающей при работе вентиляционного оборудования. При недостаточной звукоизоляции стенок каналов наблюдается значительное зашумление находящихся вблизи каналов участков здания. Для разработки защиты от шума магистральных газозвудушных каналов требуется точное представление о его формировании и распределении внутри каналов при работе вентиляционных систем.

В статье рассматривается существующий опыт расчета шума в крупногабаритных каналах методами, разработанными авторами статьи, в которых учитываются особенности формирования звуковых полей в каналах.

Распределение отраженной звуковой энергии в каналах имеет ряд особенностей. Экспериментальные исследования [1, 2] показали, что плотность отраженной звуковой энергии в поперечном сечении каналов изменяется незначительно в сравнении с её изменениями по длине канала. Подобное распределение энергии позволяет считать отраженное звуковое поле в них одномерным  $\varepsilon^{omp} = f(x)$  и тем самым существенно упростить методику расчета уровней звукового давления в каналах.

Исходя из таких представлений о шумовом поле, формирующемся внутри каналов, на основе статистической энергетической модели отраженного шумового поля в замкнутых воздушных объемах [3] были разработаны методы расчета распространения шума в крупногабаритных каналах газозвудушных систем [4, 5]. При разработке методов предполагалось, что отражение звуковой энергии от внутренних поверхностей стенок каналов соответствует диффузной модели отражения звука от ограждений. В этом случае суммарный уровень звукового давления в  $i$ -ой точке канала может вычисляться по формуле

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

где  $I_0$  – интенсивность звука на пороге слышимости;

$c$  – скорость звука;

$\varepsilon_i^{pp}$ ,  $\varepsilon_i^d$  – плотности прямой звуковой энергии и диффузно отраженной энергии.

Расчет плотности прямой энергии  $\varepsilon_i^{pp}$  не представляет сложностей. Например, в случае, если источником шума является все входное отверстие канала, расчет плотности прямой энергии производится по формуле

$$\varepsilon_i^{pp} = W / cS_i, \quad (2)$$

где  $W$  – акустическая мощность источника шума;  $c$  – скорость звука;

$S_i$  – площадь воображаемой поверхности в виде параллелепипеда со скругленными ребрами, опирающегося на излучающее в канал отверстие и проходящего через  $i$ -ю расчетную точку

$$S_i = ab + \pi r_i(a + b) + 2\pi r_i^2; \quad (3)$$

$h$ ,  $b$  – размеры сечения канала;  $r_i$  – расстояние до  $i$ -ой расчетной точки канала.

Для определения отраженной энергии  $\varepsilon_i^d$  в работе [4] предложены аналитические формулы, полученные на основе статистической энергетической модели при условии, что вся отраженная энергия в канал вводится в месте расположения источника шума [6].

Более точный метод расчета отраженной составляющей шума предложен в работе [5]. В этом случае для реализации статистической энергетической модели используется численный метод энергетических балансов. Метод позволяет учитывать конкретные звукопоглощающие характеристики поверхностей канала. Ввод отраженной энергии, образующейся при падении прямого звука на стенки канала, учитывается в методе конкретно для каждого рассматриваемого участка ограждения.

В результате сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных, полученных численным методом, установлено, что в ряде случаев наблюдаются значительные расхождения между экс-

периментом и расчетом. В дальних от источника шума зонах канала расчетные данные оказываются ниже экспериментальных значений. На основе анализа установлено, что реальный характер отражения звука от ограждений не соответствует принятой в рассмотренных выше диффузной модели отражения. Выявлено, что наиболее близкой к реальному характеру отражения является зеркально-диффузная модель отражения звука [7].

Для расчета шума в замкнутых воздушных объемах при зеркально-диффузном характере отражения звука разработана комбинированная расчетная модель, основные положения которой применительно к различным расчетным ситуациям изложены в работах [8, 9, 10, 11, 12]. Данный подход использован и при разработке численного комбинированного метода расчета шума, распространяющегося внутри крупногабаритных газозвудушных каналов [13, 14].

При зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений внутри канала кроме прямого звука образуется два отраженных звуковых поля: поле зеркально отраженной энергии и диффузно рассеянное поле. В этом случае суммарный уровень звукового давления в  $i$ -ой расчетной точке канала вычисляется по формуле

$$L_i = 10 \lg [c(\varepsilon_i^{np} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^d) / I_0], \quad (4)$$

где  $\varepsilon_i^{np}$ ,  $\varepsilon_i^3$ ,  $\varepsilon_i^d$  – плотности прямой звуковой энергии, зеркальной и диффузно рассеянной составляющих отраженной энергии.

Для определения плотностей прямой и зеркально отраженной энергий используется метод прослеживания лучей, а для диффузно рассеянной энергии численный статистический энергетический метод. Методика расчета шума в канале комбинированным мето-

дом включает следующие основные операции [13, 14]: канал разбивается на элементарные объемы со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $h$  (рисунок) и определяются узловые точки одномерной сетки; для каждой точки определяются плотности  $\varepsilon_i^{np}$  и  $\varepsilon_i^3$ ; находят величины диффузно отраженной энергии, вносимые при рассеянии отражаемых от поверхности звуковых лучей; для всех объемов с учетом граничных условий записываются уравнения балансов диффузной отраженной энергии; производится решение полученной системы уравнений, в результате которого определяются величины  $\varepsilon_i^d$ ; находится суммарная плотность энергии по формуле (4).

При расчете энергии прямого звука и зеркально отраженной энергии методом прослеживания лучей используется подход, при котором принимаются лучи с бесконечно малыми пространственными углами распространения [14].

Плотность прямой энергии в элементарном объеме определяется по формуле

$$\varepsilon_i^{np} = \sum_{k=1}^{K_{np}} W_{ki}^{np} / cS_{np}, \quad (5)$$

где  $K_{np}$  – количество лучей прямого звука, прошедших через  $i$ -й элементарный объем;

$$W_{ki}^{np} = \frac{W}{N} \exp(-m_e R_{ki}); \quad (6)$$

$N$  – количество лучей, исходящих из источника;  $m_e$  – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе,  $m^{-1}$ ;  $R_{ki}$  – расстояние, проходимое  $k$ -м лучом от источника звука до  $i$ -го элементарного объема, м.

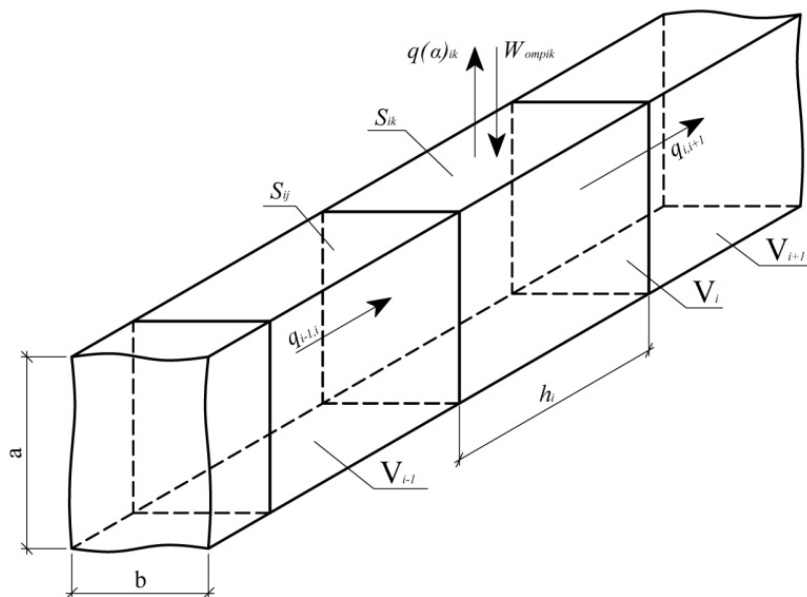


Рис. Схема разбиения канала на элементарные объемы

Количество зеркально отраженной энергии в  $i$ -ом элементарном объеме равно сумме энергий  $K$  лучей, проходящих через него, и ее плотность определяется как

$$\varepsilon_i^3 = \sum_{k=1}^{K_3} W_{ki}^3 / cS_{np}, \quad (7)$$

где  $S_{np}$  – приведенная площадь сечения элементарного объема. Для канала, в котором весь объем разбивается на элементарные объемы в виде параллелепипедов, за такую площадь можно принять площадь поперечного сечения сферы, равной по объему элементарному параллелепипеду;

$$W_{ki}^3 = \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki}) \prod_{p=1}^P [(1-\alpha_p)\xi_p]^{D_p}, \quad (8)$$

$\alpha_p$  – коэффициент звукопоглощения  $p$ -й поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч;  $P$  – общее число актов отражения  $k$ -го луча от всех отражающих поверхностей, 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  $R_{ki}$ ;  $\xi_p$  – доля энергии, направляемая по  $k$ -му лучу после его отражения от  $p$ -ой поверхности ограждения.

Для оценки распределения плотности диффузно отраженной энергии  $\varepsilon_i^d$  используется метод энергетических балансов. Суть метода заключается в составлении уравнений баланса диффузно отраженной энергии для каждого элементарного объема канала. Распределение энергии находится из решения системы уравнений [13].

Для элементарного объема канала баланс отраженной энергии записывается как

$$(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})S + \sum_{m=1}^4 W_{mi}^d - \sum_{m=1}^4 q_{(a)mi} S_{mi} - cm_g \varepsilon_i^d V_i = 0 \quad (9)$$

Здесь  $(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})$  – разность плотностей потоков энергии, входящих в  $i$ -й объем и выходящих через сечение  $S=a \cdot b$ ;  $q_{(a)mi}$  – плотность потока диффузно отраженной энергии, поглощаемой на  $m$ -ой поверхности  $i$ -го объема, являющейся поверхностью канала с площадью  $S_{mi}$ ;  $W_{mi}^d$  – диффузная энергия, поступающая в  $i$ -й объем после отражения зеркальных лучей от  $m$ -ой поверхности  $i$ -го объема и перехода части их энергии в диффузную;  $V_i = a \cdot b \cdot h$  – объем  $i$ -го элемента;  $\varepsilon_i^d$  – плотность диффузно отраженной энергий в  $i$ -м объеме.

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

$$q_{i-1,i} = -\eta(\varepsilon_{i-1}^d - \varepsilon_i^d)/h_i; \\ q_{i,i+1} = -\eta(\varepsilon_i^d - \varepsilon_{i+1}^d)/h_i, \quad (10)$$

где  $\eta = 0,5cl_{cp}$  – коэффициент связи потока и градиента плотности в квазидиффузном звуковом поле [3];

$l_{cp}$  – длина среднего свободного пробега звуковых волн в канале.

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

$$q_{(a)mi} = \frac{\alpha_{mi} \cdot c\varepsilon_i^d}{2(2 - \alpha_{mi})}, \quad (11)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент звукопоглощения  $m$ -ой поверхности  $i,j,k$ -го объема.

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

$$W_{mi}^d = (1 - \alpha_{mi})(1 - \xi_m) \left( \sum_{k=1}^{K_3} W_{ki}^3 + \sum_{k=1}^{K_{np}} W_{ki}^{np} \right), \quad (12)$$

где  $K$  – количество лучей, упавших на  $m$ -ю поверхность  $i$ -го объема;  $\xi_m$  – доля зеркальной энергии, направляемая по лучу после его отражения от  $m$ -ой поверхности ограждения канала;  $\alpha_m$  – коэффициент звукопоглощения  $m$ -й поверхности канала.

Оценка точности метода выполнена в работе [14].

При использовании данного метода, необходимо иметь сведения о величине  $\xi_p$ , составляющей долю энергии отражаемой зеркально. Предварительно выполненные исследования показали, что в каналах из бетона и кирпича  $\xi_p \approx 0.70 \div 0.80$ , в каналах из стали  $\xi_p = 0.95$ .

Расчеты шума в каналах позволяют проектировать звукоизоляцию стенок каналов исходя из требуемого уровня шума на участках зданий, облучаемых шумом, излучаемых стенками каналов. Методика такого расчета приведена в работе [15, 16].

Таким образом, выполненные экспериментальные и теоретические исследования распределения звуковой энергии внутри каналов свидетельствуют о формировании в них отраженных звуковых полей, образованных в них зеркальными отражениями звука от ограждений и диффузно рассеянной при отражениях энергии. Для расчета шума в таких условиях наиболее приемлемым является комбинированный метод расчета, реализующий зеркально-диффузную модель отражения звука от ограждений канала. Разработанная комбинированная модель дает возможность проектировать требуемую звукоизоляцию стенок каналов.

## Литература

1. Гусев, В. П. К вопросу о распространении шума в крупногабаритных газозвуковых каналах / В. П. Гусев, М. А. Солодова // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 5. – С. 211–219.
2. Солодова, М. А. Экспериментальные исследования шума в аналоге крупногабаритных воздушных каналов / М. А. Солодова, Е. О. Солотатин // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3–1. – С. 97–102.
3. Леденев, В. И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании

производственных зданий / В. И. Леденев. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2000. – 156 с.

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

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

6. Антонов, А. И. Оценка способов ввода энергии первых отражений в помещение при численном статистическом энергетическом методе расчета шумовых полей / А. И. Антонов, А. Е. Жданов, А. Ю. Воронков // *Труды ТГТУ: сборник науч. статей ТГТУ. Вып. 12*. – Тамбов, 2002. – С. 55–59.

7. 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*. – 2017. – № 2 (42). – С. 16–23.

8. Леденев, В. И. Расчет энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях сложной формы с технологическим оборудованием / В. И. Леденев, А. М. Макаров // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2008. – № 2. – С. 94–101.

9. Антонов, А. И. Комбинированный метод расчета шумового режима в производственных зданиях теплоэлектроцентралей / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2011. – № 2. – С. 16–24.

10. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection / I. Tsukernikov, A. Antonov, V. Ledenev, I. Shubin, T. Nevenchannaya // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 176. – С. 218.

11. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных помещениях с перегородками неполной высоты / В. П. Гусев, А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2017. – № 2 (368). – С. 260–267.

12. Гиясов, Б. И. Метод расчета шума при зеркально-рассеянном отражении / Б. И. Гиясов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // *Инженерно-строительный журнал*. – 2018. – № 1 (77). – С. 13–22.

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

14. 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.

15. 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.

16. 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.

**O.A. Zhogoleva, S.A. Zhogolev, E.O. Solomatin**  
Tambov State Technical University

#### **NOISE CALCULATION IN THE DESIGN OF GAS-AIR CHANNELS SOUNDPROOFING (MODERN THEORY AND PRACTICE)**

The article considers the experience of noise calculation in large-sized gas-air channels. The features of the noise formation inside the channels connected with their geometric and acoustic parameters are shown. Calculation methods developed by the authors are considered taking the nature of the sound reflection from the internal surfaces of the channel walls into account.

Gas-air channel, sound energy propagation, calculation of noise levels, sound reflection from fences.