

УДК 534.2

*Т. С. Яровая\**

## ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ШУМА В ПРОСТРАНСТВАХ ПОДВЕСНЫХ ПОТОЛКОВ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

В общественных зданиях пространство между подвесным потолком и вышележащим перекрытием часто используют для размещения различных инженерных систем и коммуникаций, в том числе и для размещения воздуховодов. При работе воздуховоды излучают звуковую энергию, тем самым создавая высокие уровни шума. Этот шум проникает в смежные помещения и создает в них неудовлетворительный шумовой режим. Во избежание этого необходимо решить две задачи: произвести расчет звукового давления в пространствах подвесных потолков и запроектировать требуемые шумозащитные мероприятия. В данной статье рассматривается возможное решение первой задачи.

Как правило, воздуховоды делят пространства подвесных потолков на отдельные плоские объемы, являясь в этом случае их боковыми стенками, излучающими в эти объемы звуковую энергию. Уровень звукового давления при этом определяется как

$$L_i = 10 \lg \left( (\varepsilon_{\text{при}} + \varepsilon_{\text{отри}}) c / I_0 \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{при}}$  – плотность звуковой энергии, создаваемая поверхностью воздуховода как источником прямого звука в  $i$ -й точке пространства;  $\varepsilon_{\text{отри}}$  – плотность отраженной звуковой энергии в  $i$ -й точке, создаваемая прошедшим через стенку воздуховода звуком;  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – пороговая интенсивность звука;  $c$  – скорость звука.

Так как длина боковых стенок воздуховода значительно больше высоты поперечного сечения, то воздуховод можно отнести к линейному источнику шума. Оценить распределение прямой звуковой энергии в этом случае можно, используя метод, изложенный в [1]. При этом для излучающих звук поверхностей ограждений канала модель излучения энергии можно принять соответствующей закону Ламберта. Тогда линейная мощность излучения боковой стенки воздуховода  $p'$ , Вт/м,

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора В. И. Леденева.

будет определяться как  $p'(\alpha) = p' \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между плоскостью, перпендикулярной к поверхности воздуховода и расположенной по центру высоты воздуховода, и плоскостью, проходящей через центр высоты воздуховода и расчетную точку в пространстве потолка. С достаточной для практики точностью положения расчетных точек можно принимать в середине высоты пространства потолка. В этом случае  $\cos \alpha = 1$ .

Так как прямая и отраженная энергия в воздуховодах не постоянны по длине, при практических расчетах величину линейной мощности излучения стенкой можно принимать равной средней величине

$$p'_{\text{ср}} = \int_{L_B} p' dL / L_B, \quad (1)$$

где  $L_B$  – длина воздуховода в пределах пространства потолка.

Схема к расчету прямой энергии от линейного источника, мощностью  $p'_{\text{ср}}$ , размещенного в воздушном пространстве потолка, приведена на рис. 1.

Учитывая, что  $p'_{\text{ср}} dL = (p'_{\text{ср}} r \cos^2 \varphi) d\varphi$ , плотность прямого звука в любой  $i$ -й расчетной точке согласно [2] будет определяться как

$$\varepsilon_{\text{при}i} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varepsilon_{\text{при}i} = \frac{p'_{\text{ср}}}{\pi r_i c} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1), \quad (2)$$

где

$$d\varepsilon_{\text{при}i} = (p'_{\text{ср}} \cos \varphi / \pi r_i c) d\varphi. \quad (3)$$

Сформированная прошедшей через стенку воздуховода звуковой энергией отраженная энергия распределяется в пространствах потолков по более сложным зависимостям. Отраженное звуковое поле имеет квазидиффузный характер, при котором сохраняется признак диффуз-

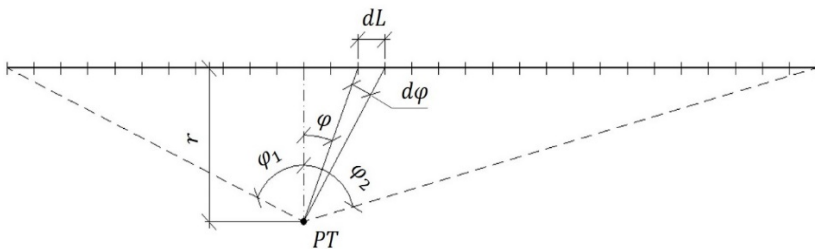


Рис. 1. Схема к расчету прямой звуковой энергии от стенки воздуховода, как линейного источника шума

ности поля по изотропности угловой направленности энергии, но не обеспечивается условие однородности шумового поля в плоскости.

Согласно [1], в квазидиффузных отраженных звуковых полях между плотностью потока  $q$  и градиентом плотности отраженной звуковой энергии существует связь, определяемая в виде

$$q = -\eta \text{grad}\epsilon, \quad (4)$$

где  $\eta = 0,5c l_{\text{ср}}$  – коэффициент переноса отраженной звуковой энергии в условиях квазидиффузного поля;  $l_{\text{ср}}$  – средняя длина свободного пробега отраженных звуковых волн в замкнутом воздушном объеме.

Плотность отраженной энергии, поглощаемой на границах помещения, в случае квазидиффузного поля, согласно [1], определяется как

$$q|_S = \frac{\alpha_S c \epsilon}{2(2 - \alpha_S)} \Big|_S, \quad (5)$$

где  $\alpha_S$  – коэффициент звукопоглощения поверхности.

Используя (5) и (6), можно описать распределение отраженной энергии в пространстве потолка. Пространство подвесного потолка относится к плоским объемам, в которых плотность отраженной энергии постоянна по всему поперечному сечению и меняется только по мере удаления от стенки, т.е.  $\epsilon_{\text{отр}} = f(x)$ , где  $x$  – координата по оси помещения с началом у стенки воздуховода. В качестве приближения можно принять также условие, что отраженная энергия вводится в помещение только в сечении у стенки воздуховода. Возможность такого приближения показана в работе [2]. Баланс отраженной энергии для элемента поперечного сечения пространства размером  $dx$  можно записать как

$$\begin{aligned} -\eta F(d\epsilon_{\text{отр}}/dx) - (-\eta F(d\epsilon_{\text{отр}}/dx)) - (-\eta F(d^2\epsilon_{\text{отр}}/dx^2)) dx = \\ = \alpha_{\text{ср}} c \epsilon_{\text{отр}} U dx / (2/(2 - \alpha_{\text{ср}})) + c m_{\text{в}} \epsilon_{\text{отр}} F dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда

$$\eta \frac{d^2\epsilon_{\text{отр}}}{dx^2} = \frac{\alpha_{\text{ср}} c \epsilon_{\text{отр}}}{2(2 - \alpha_{\text{ср}}) F} U + c m_{\text{в}} \epsilon_{\text{отр}}. \quad (7)$$

Здесь  $F$  и  $U$  – площадь и периметр поперечного сечения пространства, параллельного воздуховоду;  $m_{\text{в}}$  – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе;  $\alpha_{\text{ср}}$  – средний коэффициент звукопоглощения.

Уравнение (9) удобнее записать в виде

$$d^2\varepsilon_{\text{отр}}/dx^2 - \varphi^2\varepsilon_{\text{отр}} = 0, \quad (8)$$

где

$$\varphi = \sqrt{\alpha_{\text{ср}}cU/(2(2 - \alpha_{\text{ср}})F\eta) + cm_{\text{в}}/\eta}. \quad (9)$$

Общее решение уравнения (9) имеет вид

$$\varepsilon_{\text{отр}} = C_1e^{\varphi x} + C_2e^{-\varphi x} = 0. \quad (10)$$

Значения постоянных  $C_1$  и  $C_2$  определяются из граничных условий.

Мощность отраженной звуковой энергии при действии линейного источника определяется по формуле

$$P_{\text{отр}} = p'_{\text{ср}}L_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{ср}}). \quad (11)$$

В этом случае граничные условия запишутся в виде

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } x = 0 \quad -(\eta F / d\varepsilon_{\text{отр}})dx = P_{\text{отр}}, \\ \text{при } x = \infty \quad \varepsilon = 0. \end{array} \right\} \quad (12)$$

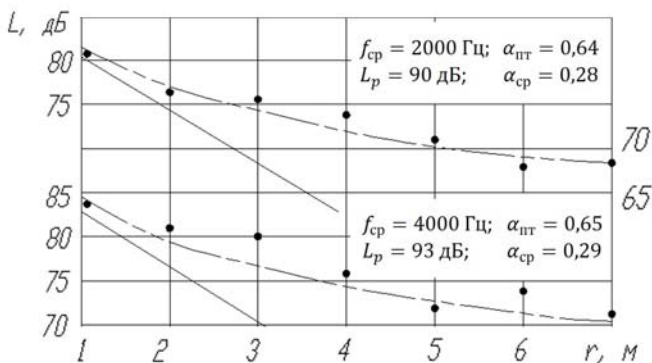
Решение уравнения (9), удовлетворяющее условиям (13), имеет вид

$$\varepsilon_{\text{отр}} = P_{\text{отр}}e^{-\varphi x}/(\varphi\eta F). \quad (13)$$

Оценку шума от воздуховодов в подвесных потолках можно производить по формуле (1), используя для определения плотности прямой и отраженной энергии соответственно формулы (3) и (14). В окончательном виде формулу для расчета уровней звукового давления при линейном источнике можно записать в виде

$$L_i = 10\lg \left[ p'_{\text{ср}} \left( \frac{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1}{\pi r_i c} + \frac{L_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{ср}})}{\varphi\eta F} e^{-\varphi x} \right) c / I_0 \right]. \quad (14)$$

Экспериментальная проверка формулы (15) показала достаточную точность (см. рис. 2). Расхождения результатов расчетов и эксперимента не превышают  $\pm 3$  дБ в удаленных от воздуховода точках пространств подвесного потолка.



**Рис. 2. Расчетные и экспериментальные уровни звукового давления в пространстве подвесного потолка размерами 11,8×9,4×1,8 м при наличии в нем излучающего шум воздуховода:**

$\alpha_{пт}$ ,  $\alpha_{ср}$  – коэффициент звукопоглощения потолка и средний коэффициент звукопоглощающих поверхностей;  $L_p$  – общая звуковая мощность воздуховода, дБ;  $f_{ср}$  – среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц (сплошная линия – прямой звук; пунктир – расчетные данные; точки – экспериментальные данные)

### Список литературы

1. Антонов, А. И. Расчеты уровней прямого звука от линейных источников шума, располагающихся на промышленных предприятиях и в городской застройке / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Е. О. Соломагин // Вестник ВолгГАСУ. Серия. Строительство и архитектура. – 2013. – № 31–1(50). – С. 329 – 335.
2. Гиясов, Б. И. Энергетический метод расчета шума, проникающего в плоские помещения через стены / Б. И. Гиясов, А. И. Антонов, И. В. Матвеева // Вестник МГСУ. – 2014. – № 9. – С. 22 – 31.

*Кафедра «Городское строительство и автомобильные дороги»  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*