

УДК 534.2

МЕТОД ОЦЕНКИ ШУМОВОГО РЕЖИМА В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ С АНФИЛАДНЫМИ СИСТЕМАМИ ПЛАНИРОВКИ

**А. И. Антонов, А. В. Головко,
О. А. Жоголева, В. И. Леденев**

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов; ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. П. Ярцев

Ключевые слова и фразы: анфиладная система планировки; звуковое поле; снижение шума; шумовой режим.

Аннотация: Предложен метод расчета шума в помещениях с анфиладными системами планировки, имеющими широкое распространение в зданиях общественного назначения. Метод учитывает условия формирования шумового поля в каждом отдельном объеме системы и наличие между ними открытых проемов. Адекватность метода подтверждена соответствием между экспериментальными и расчетными данными, полученными для анфиладной системы из пяти помещений.

Шумовое загрязнение один из наиболее негативных параметров среды, влияющих на экологические условия в помещениях современных гражданских зданий. В этой связи оценка шумового режима в зданиях важная задача, требующая своего решения на стадии проектирования объекта. Решение возможно при наличии надежных методов расчета распределения звуковой энергии, объективно учитывающих влияние различных факторов на формирование шумового режима.

По условиям формирования шумовых полей большинство планировочных систем гражданских зданий являются системами акустически связанных помещений [1 – 3]. Акустическая связь в них осуществляется не-

Антонов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий», ТамбГТУ, г. Тамбов; Головко Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», e-mail: gsiad@mail.tambov.ru, ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск; Жоголева Ольга Александровна – аспирант кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»; Леденев Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги», ТамбГТУ, г. Тамбов.

посредственно через открытые проемы, а также через звукоизолирующие преграды. Факторами, влияющими на распределение звуковой энергии в такой системе, являются ее планировочное решение, место положения источника шума, звукопоглощающие характеристики поверхностей ограждений и убранства, звукоизолирующие свойства стен и перегородок, вид звукового поля в каждом отдельном помещении и др. [4]. В этой связи определение энергетических параметров шумового поля в гражданских зданиях есть многофакторная задача, для решения которой необходимы расчетные методы, комплексно учитывающие все особенности формирования шумовых полей в конкретных акустически связанных системах помещений.

Ниже рассматриваются принципы и метод решения такой задачи для общественных зданий с анфиладной системой планировки.

Анфиладные системы планировки имеют широкое распространение в общественных зданиях, например в музеях, выставочных залах и т. п. С позиции акустики их можно рассматривать как системы акустически связанных через открытые проемы помещений, в одном из которых или во всех располагаются различные источники шума. Как правило, помещения анфилад относятся к соразмерным объемам, в которых формируются диффузные звуковые поля с равномерным распределением звуковой энергии в пределах каждого объема. В этом случае при оценке распределения шума в системе можно использовать методы расчета, основанные на статистической теории акустики [1, 5].

В общем виде с позиций статистической акустики звуковое поле в акустически связанных соразмерных помещениях описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dE}{dt} = AE(t) + W(t),$$

$$E(t) = \begin{pmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ \vdots \\ E_n(t) \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} \eta_1 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} \dots \beta_{1,n} \\ \beta_{2,1} & \eta_2 & \beta_{2,3} \dots \beta_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{n,1} & \beta_{n,2} & \beta_{n,3} \dots \eta_n \end{pmatrix}; W(t) = \begin{pmatrix} W_1(t) \\ W_2(t) \\ \vdots \\ W_n(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $E_i(t)$ – звуковая энергия в i -м помещении, Дж; $W_i(t)$ – акустическая мощность источников в i -м помещении, Вт; η_i – коэффициент потерь звуковой энергии в i -м помещении, c^{-1} ; β_{ij} – коэффициент передачи звука из j -го в i -е помещение, c^{-1} .

При заданных начальных условиях $E(t_0) = E_0$ решение системы (1) представляется в виде

$$E(t) = e^{A(t-t_0)} E_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} W(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(At)^k}{k!}$ – матричная экспонента; τ – время определяющее работу источника, с.

Плотность звуковой энергии в i -м помещении вычисляется как

$$\varepsilon_i(t) = E_i(t) / V_i, \quad (3)$$

где V_i – объем i -го помещения, м³.

Соответственно, уровень звукового давления в i -м помещении определяется как

$$L_i(t) = 10 \lg(\varepsilon_i(t)c / I_0), \quad (4)$$

где c – скорость звука в воздухе, м/с; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – интенсивность звука на пороге слышимости.

Для двух акустически связанных помещений решения могут быть получены в простом виде. При большом числе помещений эффективнее численные алгоритмы решения непосредственно системы дифференциальных уравнений.

Выражение (3) может быть использовано для оценки качества озвучивания в помещениях анфиладной планировки с открытыми проемами, например, в залах железнодорожных вокзалов. В этом случае возможно рассмотрение суперпозиции звуковых полей от полезного сигнала и помех. На основе данного подхода может также решаться задача по оценке распространения непостоянного во времени шума, например, импульсного шума в связанных помещениях [6].

При стационарном шумовом режиме $dE/dt = 0$ значения звуковой энергии в помещениях находятся из решения алгебраической системы уравнений (1)

$$E = -A^{-1}W. \quad (5)$$

Результаты решения системы уравнений (5) позволяют оценить эффективность снижения шума в помещениях за счет устройства звукопоглощающих облицовок.

Решение систем уравнений, в которых учитывается активная и пассивная акустические связи помещений коэффициентами β_{ij} и β_{ji} , (в общем случае $\beta_{ji} \neq \beta_{ij}$) возможно численными методами, например, для системы (5) методом Гаусса.

Более простые решения можно получить, учитывая лишь пассивную акустическую связь помещений, пренебрегая при этом звуковой энергией, возвращающейся из вторичного помещения в первичное. Упрощение возможно в силу того, что уровни звуковой энергии во вторичном помещении для большинства реальных случаев значительно меньше уровней в первичном помещении. Погрешность расчетов при этом не будет превышать 3 дБ.

Система уравнений в этом случае для n последовательно связанных помещений при расположении источника в первом из них имеет вид

$$\begin{cases} dE_1/dt = W(t) + \eta_1 E_1(t); \\ dE_2/dt = \beta_{2,1} E_1(t) + \eta_2 E_2(t); \\ \dots \\ dE_n/dt = \beta_{n,n-1} E_{n-1}(t) + \eta_n E_n(t). \end{cases} \quad (6)$$

Общее решение системы (6) можно получить методом вариации произвольных постоянных. Например, при решении системы уравнений для трех помещений с условиями $\eta_1 \neq \eta_2 \neq \eta_3$ величина звуковой энергии в третьем помещении при $W(t) = \text{const}$ определяется как

$$E_3(t) = \frac{\beta_{2,1} \beta_{3,2} W}{\eta_1 \eta_2} \left(\frac{1 - e^{-\eta_3 t}}{\eta_1} + \frac{e^{-\eta_3 t} - e^{-\eta_2 t}}{\eta_3 - \eta_2} \right) + \frac{\beta_{3,2} W}{\eta_2 - \eta_1} \left(\frac{e^{-\eta_3 t} - e^{-\eta_1 t}}{\eta_2 - \eta_1} - \frac{e^{-\eta_3 t} - e^{-\eta_2 t}}{\eta_3 - \eta_2} \right). \quad (7)$$

При стационарном режиме работы источника звуковая энергия в k -м помещении будет определяться следующим выражением

$$E_k = \frac{\beta_{2,1} \beta_{3,2} \cdots \beta_{k,k-1} W}{\eta_1 \eta_2 \cdots \eta_k} \quad (8)$$

и, соответственно, уровни звукового давления в k -м помещении вычисляются как

$$L_k = 10 \lg \left(\frac{E_k}{V_k} c / I_0 \right). \quad (9)$$

В ряде случаев для практики борьбы с шумом необходимо знать спады уровней в k -м помещении относительно первого помещения.

Спад будет определяться по формуле

$$\Delta L_{1,k} = 10 \lg \frac{\eta_2 \eta_3 \cdots \eta_k V_k}{\beta_{2,1} \beta_{3,2} \cdots \beta_{k,k-1} V_1}. \quad (10)$$

Из формул (8) и (10) следует, что для определения величины звуковой энергии в каком-либо из акустически связанных помещений необходимо знать коэффициенты потерь энергии η и коэффициенты передачи звука β .

Определение коэффициента η_i для i -го помещения системы в случае диффузного звукового поля с достаточной точностью можно производить по формуле

$$\eta_i = - \frac{c}{l_{\text{ср}i}} \ln(1 - \alpha_i), \quad (11)$$

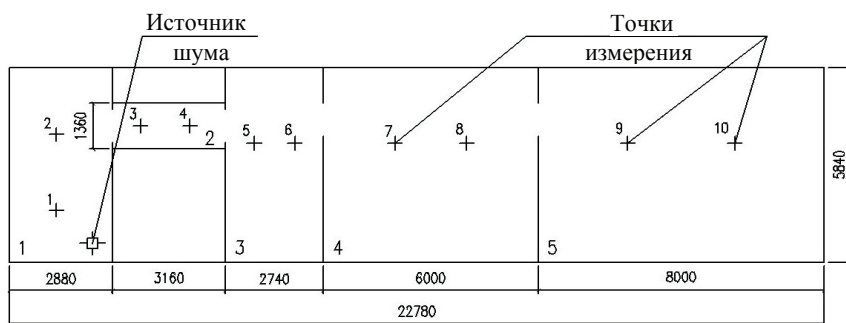
где α_i – средний коэффициент звукопоглощения i -го помещения; $l_{\text{ср}i}$ – средняя длина свободного пробега звуковых волн в i -ом помещении, м.

Коэффициент передачи звуковой энергии в условиях диффузного поля β_{ij} при открытых проемах между помещениями анфилады будет вычисляться как

$$\beta_{ij} = \frac{c S_{ij}}{l_{\text{ср}i} S_i}, \quad (12)$$

где S_{ij} – площадь проема связывающего i -е и j -е помещения, м^2 ; S_i – площадь ограждений i -го помещения, м^2 .

На рисунке (а) приведена схема акустически связанных помещений, для которых выполнен натурный эксперимент и произведен расчет спадов уровней звукового давления с использованием формул (8), (10)–(12).



а)

ΔL , дБ

*	*	—				$f_{cp} = 4000$ Гц
10			—			
				*	*	
1	2	3	—		4	5
					—	
					*	*

б)

Схема измерений (а) и спады уровней звукового давления (б) в пяти акустически связанных открытыми проемами помещениях в октавной полосе с $f_{cp} = 4000$ Гц:

* – экспериментальные данные; — – результаты расчета

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для пяти последовательно соединенных помещений высотой 3,3 м с проемами $0,9 \times 2,0$ (h) м при коэффициенте звукопоглощения $\alpha = 0,2$ м в октавной полосе частот с $f_{cp} = 4000$ Гц приведено на рисунке (б). Видно, что предложенный метод обеспечивает требуемую точность расчетов, расхождения результатов экспериментальных и расчетных данных не превышают ± 2 дБ.

Таким образом, для описания звуковых полей в анфиладных системах помещений при диффузном звуке и для разработки строительно-акустических мероприятий по снижению шума в них можно использовать предложенный метод. Он позволяет учитывать конкретные условия формирования шумового режима в отдельных помещениях анфилад и акустическую связь между ними.

Список литературы

1. Метод расчета шума в квартирах с ячейковыми системами планировки / А. И. Антонов [и др.] // Жилищное строительство. – 2013. – № 7. – С. 33 – 35.
2. Антонов, А. И. Метод расчета шумового режима в зданиях с коридорными системами планировки / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 3(47). – С. 28 – 32.
3. Влияние звукопоглощения помещений и звукоизоляции дверей на шумовой режим в квартирах жилых зданий / А. И. Антонов [и др.] // Жилищное строительство. – 2014. – № 6. – С. 45 – 48.
4. Воронков, А. Ю. Метод оценки шумового режима квартир / А. Ю. Воронков, А. Е. Жданов, В. И. Леденев // Жилищное строительство. – 2004. – № 11. – С. 15 – 17.

5. Осипов, Г. Л. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г. Л. Осипов, Е. Я. Юдин. – М. : Строиздат, 1987. – 558 с.

6. Антонов, А. И. Оценка шума в помещениях с источниками импульсного звука периодического действия / А. И. Антонов, А. В. Бацунова, С. И. Крышов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3-1. – С. 48 – 53.

References

1. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Shubin I.L. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2013, no. 7, pp. 33-35.

2. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2013, no. 3(47), pp. 28-32.

3. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Shubin I.L. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2014, no. 6, pp. 45-48.

4. Voronkov A.Yu., Zhdanov A.E., Ledenev V.I. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2004, no. 11, pp. 15-17.

5. Osipov G.L., Yudin E.Ya. *Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh raionakh* (Noise reduction in buildings and residential areas), Moscow: Stroizdat, 1987, 558 p.

6. Antonov A.I., Batsunova A.V., Kryshov S.I. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 3-1, pp. 48-53.

Noise Assessment Method for Public Buildings with Enfilade Layout

A. I. Antonov, A. V. Golovko, O. A. Zhogoleva, V. I. Ledenev

*Tambov State Technical University, Tambov;
Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk*

Key words and phrases: enfilade layout; noise mode; noise reduction; sound field.

Abstract: This paper proposes a method for measuring noise in enfiladed rooms that are widely used in public buildings. The method takes into account the conditions of the noise field formation in each separate volume of the system and the presence of open apertures between them. The adequacy of the method is confirmed by the correspondence between the experimental and calculated data obtained for an enfilade of five rooms.

© А. И. Антонов, А. В. Головки,
О. А. Жоголева, В. И. Леденев, 2014

Статья поступила в редакцию 10.11.2014 г.