

УДК 534.833.522.4

**К РАСЧЕТУ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДЕНИЯ  
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СЛОИСТЫХ ВИБРОДЕМПФИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**TO CALCULATION OF SOUND INSULATION OF THE PROTECTION  
AT RECONSTRUCTION OF BUILDINGS WITH USE  
OF LAYERED VIBRODEMPFIROVANNY ELEMENTS**

*И.Л. ШУБИН, Н.А. КОЧКИН*  
*I.L. SHUBIN, N.A. KOCHKIN*

(Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук)  
(Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)  
E-mail: niisf@niisf.ru; vol.nikit@inbox.ru

*Предложен метод расчета звукоизоляции существующего ограждения при реконструкции здания путем устройства на отnose слоистого вибродемпфированного элемента. Приведены значения колебательной скорости и излучаемой акустической мощности для определения звукоизоляции в различных частотных диапазонах.*

*The method of calculation of sound insulation of the existing protection at reconstruction of the building by the device is offered on carrying a layered vibrodempfirovanny element. Values of oscillatory speed and the radiated acoustic power for definition of sound insulation are given in various frequency ranges.*

**Ключевые слова:** слоистые вибродемпфированные элементы, колебательная скорость, излучаемая мощность, звукоизоляция ограждения с элементом на отnose.

**Keywords:** layered vibrodempfirovanny elements, oscillatory speed, the radiated power, protection sound insulation with an element on carrying.

С учетом повышения требований к звукоизоляции существующих ограждений при реконструкции зданий предлагается устройство слоистого вибродемпфированного элемента на отnose. Прохождение звука через ограждения с воздушным промежутком с облицовками из одно- и многослойных элементов одинаковой конструкции и толщин исследовано в [1...4].

В работе рассматривается звукоизоляция конструкции с использованием легкого слоистого ограждения с внутренним вибропоглощающим слоем. Такое ограждение представляет собой конструкцию с наружными жесткими листами (металл, пластик, стекло) и внутренним вибропоглощающим слоем. Звукоизоляция таких слоистых вибродемпфированных элементов представлена в [5...9]. В качестве образца выберем конструкцию, состоящую из существующего ограждения с дополнительным слоем звукопоглощающего материала и слоистого вибродемпфированного элемента (рис. 1 – схема прохождения звука через ограждения с плитой на отnose: 1 – существующее ограждение; 2 – воздушный промежуток (с возможным заполнением звукопоглощающим материалом); 3 – слоистый вибродемпфированный элемент). Поместим данный образец в проем акустически непрозрачного экрана и проследим, чтобы звуковые волны верхнего полупространства падали на одну из сторон конструкции.

Под воздействием диффузного поля верхнего полупространства в ограждении возникают изгибные волны, которые часть своей энергии передают остальным элементам конструкции. Согласно методике, пред-

ложенной в [5], при расчете излучаемой конструкцией мощности можно отдельно рассматривать элементы, на которые действуют внешние вынуждающие силы и элементы, которые в результате изгибных колебаний излучают звуковую энергию.

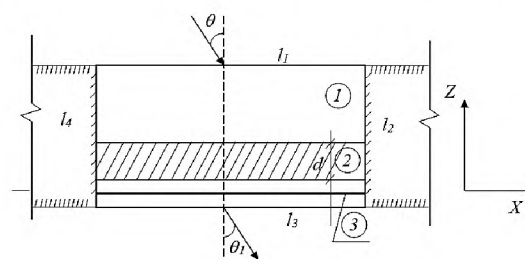


Рис. 1

Величина звукового давления в прошедшей волне связана с колебательной скоростью точек излучающей пластины. Колебательная скорость каждой точки колеблющейся системы связана со смещением известным соотношением  $V = \frac{d\xi}{dt}$ , где  $V$  – скорость колеблющейся точки,  $\xi$  – смещение.

Для определения смещения материальных точек в любом листе пластины и в произвольный момент времени используем собственные функции [5]. Воспользуемся энергетическим методом исследования. Используя принцип Остроградского-Гамильтона для движущихся упругих систем при наличии возмущающей силы и учитывая ортогональность нормальных функций, величины, необходимые для расчета излучаемой акустической мощности, будут иметь вид:

$$\int_0^{\ell} \xi^2(x) dx = \sum_{m=1}^{\infty} \xi_m^2 \int_0^{\ell} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) dx. \quad (1)$$

$$\int_0^{\ell} P(x) \xi(x) dx = \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} P_{m'} \xi_m \int_0^{\ell_1} P(x) x_1 dx, \quad (2)$$

где

$$x_1(x) = (1 + \alpha) \left[ \cos kx - e^{-kx} - \cos k\ell e^{k(x-\ell)} \right];$$

$$x_3(x) = (1 + \alpha) \left\{ \cos k\ell (\cos k\ell - 2 \sin k\ell) \left[ \cos k(x - 2\ell) - e^{-k(x-2\ell)} - \cos k\ell e^{k(x-3\ell)} \right] \right\}.$$

При исследовании собственных функций колеблющейся конструкции следует учесть, что в формировании изгибных колебаний наибольший вклад вносят опреде-

ленного типа волны, то есть такие волны, собственные числа ( $k\ell$ ) которых имеют вполне конкретные значения.

$$(k\ell)_m = m\pi + 2,225, \quad \xi_m = \frac{P_m}{m'(\omega_m^2 - \omega^2)}, \quad (3)$$

$$(k\ell)_m = m\pi + 2,225, \quad \xi_m = \frac{0,64P_m}{m'(\omega_m^2 - \omega^2)}. \quad (4)$$

В общем случае амплитуда смещений каждой точки колеблющейся конструкции

выразится как:

$$\xi_m = \frac{2P_m \int_0^{\ell_1} P(x) \xi(x) dx}{\left[ m'_1 \int_0^{\ell_1} x_1^2 dx + m'_2 \int_{\ell_1}^{\ell_2} x_2^2 dx + m'_3 \int_{\ell_2}^{\ell_3} x_3^2 dx + m'_4 \int_{\ell_3}^{\ell_4} x_4^2 dx \right] (\omega_m^2 - \omega^2)}. \quad (5)$$

Для соответствующих волновых чисел имеем:

$$(k\ell)_m = m\pi,$$

$$\xi_m = \frac{2P_m}{[m'_1 + m'_2 + m'_3 + m'_4] (\omega_m^2 - \omega^2)}, \quad (6)$$

$$(k\ell)_m = m\pi + 2,225,$$

$$\xi_m = \frac{0,424P_m}{[0,176m'_1 + 0,063m'_2 + 0,306m'_3 + 0,114m'_4] (\omega_m^2 - \omega^2)}. \quad (7)$$

По известной методике для определения излучаемой звуковой волной мощности представим, согласно преобразования Фурье,

величину колебательной скорости в виде разложения по собственным функциям:

$$V(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} V_m \xi(x) e^{i\omega t}. \quad (8)$$

Находим амплитуду звукового давления:

$$P_0 = \frac{k_0 \rho_0 c_0 V_m \int_{\ell_2}^{\ell_3} \xi_3(x) \sin \frac{m\pi}{\ell} x dx}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{\ell}\right)^2} \int_{\ell_2}^{\ell_3} \sin^2 \frac{m\pi}{\ell} x dx}. \quad (9)$$

$$W_{\text{изл}} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\int_{\ell_2}^{\ell_3} \sin^2 \frac{m\pi}{\ell} x dx} \operatorname{Re} \frac{k_0}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{\ell}\right)^2}} \sum_{m=1}^{\infty} V_m \left[ \int_{\ell_2}^{\ell_3} \xi_3(x) \sin \frac{m\pi}{\ell} x dx \right]^2. \quad (10)$$

Для рассматриваемого диапазона частот, с учетом вклада выносимого в излучение каждым типом волн, суммарное значение излучаемой акустической мощности представится выражениями:

$$W_{\text{изл}} = \frac{\rho_0 c_0}{2} V_m^2 \frac{0,124 k_0 \ell}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{\ell}\right)^2}}. \quad (11)$$

$$\bar{W}_{\text{изл}} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \ell \bar{S} [0,50 \bar{V}_m^2 (m\pi) + 0,124 \bar{V}_m^2 (m\pi + 2,225)], \quad (13)$$

где  $\bar{S} = \frac{1}{\Delta f} \left( f_B \sqrt{1 - \frac{f_\Gamma}{f_B}} - f_H \sqrt{1 - \frac{f_\Gamma}{f_H}} \right).$  (14)

В условиях нормальных колебаний, учитывая экстремальные свойства колеб-

Далее для определения излучаемой акустической мощности, усредненной за период, используя полученные соотношения (8) и (9), имеем:

$$W_{\text{изл}} = \frac{\rho_0 c_0}{2} V_m^2 \frac{0,25 k_0 \ell}{2 \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{\ell}\right)^2}}. \quad (12)$$

Расчетная излучаемая мощность, с учетом всех типов волн, вносящих наибольший вклад в процесс излучения, аналитически запишется как

лющейся пластины, потери энергии на преодоление внутреннего трения и сдвиг фаз между упругой и неупругой циклической деформацией, амплитуда смещений каждой материальной точки рассматриваемого элемента определяется соотношением:

$$\xi_m = \frac{2P_m \int_0^{\ell_1} P(x) \xi(x) dx}{\left[ \omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2 \right] \left[ m'_1 \int_0^{\ell_1} x_1^2 dx + m'_2 \int_{\ell_1}^{\ell_2} x_2^2 dx + m'_3 \int_{\ell_2}^{\ell_3} x_3^2 dx + m'_4 \int_{\ell_3}^{\ell_4} x_4^2 dx \right]}. \quad (15)$$

Для выбранного диапазона частот в случае возбуждения заданной конструкции диффузным звуковым полем усредненный квадрат колебательной скорости после ряда преобразований запишется:

$$\bar{V}^2 = \frac{2\pi \bar{P}_B^2}{[M]^2 \omega_m \Delta \omega \eta}. \quad (16)$$

Из выражения (16) видим, что коэффициент потерь и значение квадрата колебательной скорости связаны обратно пропорциональной зависимостью.

Расчетная формула нахождения излучаемой акустической мощности имеет вид:

$$W_{\text{изл}} = \frac{(\rho_0 c_0) \ell \bar{S}}{4} \cdot \frac{\pi P_0^2 (\cos 2\theta_B - \cos 2\theta_H)}{2\omega_m \Delta \omega \eta} \left[ \frac{1}{[M]^2} + \frac{0,022}{[m]^2} \right] \Phi_d^2, \quad (17)$$

где  $\Phi_d$  – добавка, показывающая измерение звукового давления в воздушном промежутке при прохождении звука:

$$\Phi_d = \cos \left( \frac{4\pi d^2 f_H f_B}{c_0^2} \right). \quad (18)$$

При практическом расчете звукоизоляции следует учитывать, что процесс согласования волновых параметров вибро- и звукополей в различных частотных диапазонах происходит по-разному. С учетом этого для области полных пространственных резонансов имеем:

$$R = 10 \lg \frac{2\eta \omega_{\text{min}} \Delta \omega}{(\rho_0 c_0)^2 \pi \bar{S} (\cos 2\theta_B - \cos 2\theta_H) Y \Phi_d^2}. \quad (19)$$

В случае неполных пространственных резонансов это будет:

$$R = 10 \lg \frac{5,8 m^2 f \Delta f \eta}{10^4 \bar{S}} - \Delta, \quad (20)$$

где  $\bar{S}$  – коэффициент звукоизлучения, равный:

$$\bar{S} = 0,04 \left[ m_B \frac{n_{\text{cp}}^2}{(n_{\text{cp}}^2 - n_{\text{cp}}'^2)^2} + n_B \frac{m_{\text{cp}}^2}{(m_{\text{cp}}^2 - m_{\text{cp}}'^2)^2} \right]. \quad (21)$$

Далее для области простых пространственных резонансов расчетная формула для определения звукоизоляции будет:

$$R = 10 \lg \frac{5,7 m^2 f \Delta f \eta}{10^3 \bar{S}} - \Delta, \quad (22)$$

$$\text{где } \bar{S} = 0,027 \Delta N \frac{m_{\text{cp}}^2 n_{\text{cp}}^2}{(n_{\text{cp}}^2 - n_{\text{cp}}'^2)^2 (m_{\text{cp}}^2 - m_{\text{cp}}'^2)^2}, \quad (23)$$

$$\Delta = 10 \lg \cos^2 \left( \frac{4\pi d^2 f_H f_B}{c_0^2} \right) \text{ и } \Delta N = \frac{aB}{4\pi} (K_{\text{нв}}^2 - K_{\text{nh}}^2) -$$

количество резонансов в избранном диапазоне частот.

## ВЫВОДЫ

Рассматривая полученные формулы для определения величины звукоизоляции конструкции со слоистыми вибродемпфированными элементами на отnose, следует помнить, что механизм самосогласования вибрационного поля пластины и звукового поля воздушного пространства различен для разных частотных интервалом и поэтому использовать полученные расчетные формулы нужно с учетом этого различия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Старцева О.В., Овсянников С.Н. Исследование звукоизоляции однослойных и двухслойных перегородок // Жилищное строительство. – 2012, №6. С. 43...46.
2. Старцева О.В., Овсянников С.Н. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок // Вестник Томского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2013, № 2 (30). С. 176...184.
3. Бобылев В.Н., Дымченко В.В., Хазов П.А. Численное моделирование звукоизолирующих каркасно-обшивных перегородок с различными типами стоечных профилей // Привожский научный журнал. – 2018, № 1 (45). С. 20...24.
4. Кочкин А.А., Борисов Л.А. Исследование звукового давления в воздушном промежутке двойной ограждающей конструкции из слоистых вибродемпфированных элементов // Жилищное строительство. – 2015, № 7. С. 52...54.
5. Кочкин А.А., Шубин И.Л., Шашкова Л.Э., Кочкин Н.А. Проектирование звукоизоляции слоистых элементов конечных размеров // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 161...167.
6. Кочкин А.А., Шубин И.Л., Кочкин Н.А., Киряткова А.В. О регулировании звукоизоляции слоистых вибродемпфированных элементов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 181...187.
7. Кочкин А.А. Исследование звукоизоляции легких ограждений с вибродемпфирующими слоями // Мат. XV Всерос. научн. конф. с международным

участием: Вузовская наука – региону. – Вологда, 2017. С. 26...28.

8. Кочкин А.А., Шубин И.Л., Кочкин Н.А. О прохождении и излучении звука в слоистых вибродемпфированных элементах // Строительство и реконструкция. – 2016, № 3(65). С. 119...125.

9. Кочкин А.А., Киряткова А.В., Кочкин Н.А. Повышение звукоизоляции легких ограждений с применением слоистых вибродемпфированных элементов // Мат. XV Всерос. научн. конф. с международным участием: Вузовская наука – региону. – Вологда, 2016. С. 174...177.

#### REFERENCES

1. Starceva O.V., Ovsyannikov S.N. Issledovanie zvukoizolyacii odnoslojnyh i dvuslojnyh peregorodok // Zhilishnoe stroitelstvo. – 2012, № 6. S. 43...46.

2. Starceva O.V., Ovsyannikov S.N. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya zvukoizolyacii peregorodok // Vestnik Tomskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2013, № 2 (30). S. 176...184.

3. Bobylev V.N., Dymchenko V.V., Hazov P.A. Chislennoe modelirovanie zvukoizoliruyushih karkasno-obshivnyh peregorodok s razlichnymi tipami stoechnyh profilej // Privozhskij nauchnyj zhurnal. – 2018, № 1 (45). S. 20...24.

4. Kochkin A.A., Borisov L.A. Issledovanie zvukovogo davleniya v vozdušnom proezhnutke dvojnoj ograzhdayushej konstrukcii iz sloistyh vibrodempfirirovannyh elementov // Zhilishnoe stroitelstvo. – 2015, № 7. S. 52...54.

5. Kochkin A.A., Shubin I.L., Shashkova L.E., Kochkin N.A. Proektirovanie zvukoizolyacii sloistyh elementov konechnyh razmerov // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2016, № 4. S.161...167.

6. Kochkin A.A., Shubin I.L., Kochkin N.A., Kiryatkova A.V. O regulirovanii zvukoizolyacii sloistyh vibrodempfirirovannyh elementov // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2016, № 4. S.181...187.

7. Kochkin A.A. Issledovanie zvukoizolyacii legkih ograzhdenij s vibrodempfiruyushimi sloyami // Мат. XV Vseros. nauchn. конф. s mezhdunarodnym uchastiem: Vuzovskaya nauka – regionu. – Vologda, 2017. S.26...28.

8. Kochkin A.A., Shubin I.L., Kochkin N.A. O prohozhdenii i izluchenii zvuka v sloistyh vibrodempfirirovannyh elementah // Stroitelstvo i rekonstrukciya. – 2016, № 3(65). S. 119...125.

9. Kochkin A.A., Kiryatkova A.V., Kochkin N.A. Povyshenie zvukoizolyacii legkih ograzhdenij s primenением sloistyh vibrodempfirirovannyh elementov // Мат. XV Vseros. nauchn. конф. s mezhdunarodnym uchastiem: Vuzovskaya nauka – regionu. – Vologda, 2016. S.174...177.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 18.06.18.