

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 699.844.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-144-157

О.В. ЛЕЛЮГА,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МАЛЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЭЛЕМЕНТОВ

Известные методы расчета конструкций здания не в полной мере учитывают структурную звукопередачу. Целью настоящей статьи являются теоретические исследования прохождения звука и вибрации на моделях здания методом статистического энергетического анализа с учетом нерезонансного прохождения и проверка данного метода экспериментально. На основе статистического энергетического анализа записаны уравнения энергетического баланса, решение системы которых позволяет определить энергию звука в помещениях и энергию звуковой вибрации в конструкциях. Приводится расчет коэффициентов энергетической связи, в том числе учитывающих нерезонансную звукопередачу из смежных акустических подсистем, внутренних потерь, плотности мод колебаний. Представлены результаты виброакустических расчетов и измерений на моделях фрагментов здания, включающих в себя одинарные и двойные перегородки. Использование разработанного метода расчета позволяет спрогнозировать передачу звука через перегородку с учетом примыкающих конструкций.

Ключевые слова: шум; воздушный шум; ограждающая конструкция; резонанс; коэффициенты энергетической связи; коэффициенты излучения звука; внутренние потери; структурная звукопередача; звукоизоляция.

Для цитирования: Лелюга О.В. Теоретические и экспериментальные исследования виброакустических систем с малым количеством элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 144–157.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-144-157

O.V. LELYUGA,

Tomsk State University of Architecture and Building

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF VIBROACOUSTIC SYSTEMS WITH THE SMALL NUMBER OF ELEMENTS

The known methods of acoustical calculation in buildings not fully describe the phenomenon of sound transmission. This paper presents theoretical studies of the sound and vibration in

building models, a method of statistical energy analysis (SEA), taking into account non-resonant phenomena and experimental testing of the specified parameters. The SEA-based equations are obtained for the energy balance, the solution of which allows to determine the sound energy in rooms and sound vibration in structures. The energy coupling coefficients, including those allowing for non-resonant sound transmission from adjacent acoustic subsystems, internal losses and the density of mode oscillation are calculated. The results of calculations and measurements of building model fragments, including identical and double partitions, are presented. The proposed method of calculation allows to predict the sound transmission through the partition with regard to adjacent structures.

Keywords: noise; air noise; wall structure; resonance; energy coupling coefficient; sound emission coefficient; internal loss; sound transmission; sound insulation.

For citation: Lelyuga O.V. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vibroakusticheskikh sistem s malym kolichestvom elementov [Theoretical and experimental research of vibroacoustic systems with the small number of elements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturostroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 3. Pp. 144–157. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-144-157

Введение

Снижение шума и обеспечение акустического комфорта в зданиях является актуальной проблемой, решение которой имеет важное социально-экономическое значение.

Как видим из рис. 1, пути распространения звуковых волн по конструкциям имеют много вариантов. Известные на данный момент методы расчета звукоизоляции конструкций здания ([1–6] и др.) не учитывают структурную звукопередачу.

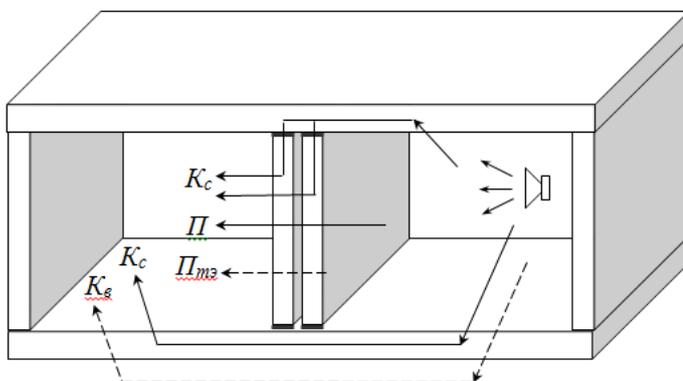


Рис. 1. Пути звукопередачи через ограждающие конструкции, дающие вклад в суммарный шум в приемном помещении:

Π – прямая звукопередача, прямое излучение разделительного элемента (собственная звукоизолирующая способность конструкции); $\Pi_{тэ}$ – излучение малых технических элементов (щели, воздухораспределители или жалюзи), установленных на разделительном элементе; K_b – косвенная воздушная звукопередача: передача звуковой энергии преимущественно по обходным воздушным путям распространения звука, например по вентиляционным системам, подвесным потолкам или коридорам; K_c – косвенная структурная звукопередача: передача звуковой энергии из помещения источника в приемное помещение по побочным путям (в основном по конструкциям здания, например стенам, полам, потолкам)

Европейской организацией стандартизации (EN) принята методика расчета звукоизоляции воздушного и ударного звука с учетом косвенной звукопередачи [7]. Звукоизоляция воздушного и ударного шума ограждающими конструкциями вычисляется с учетом звукоизолирующей способности прилегающих конструкций и усредненного по всем направлениям распространения перепада уровней вибрации, определяемого через вычисление индекса снижения вибрации в стыке. Следует отметить, что простота и доступность метода основаны на упрощенной теоретической базе. Игнорируется реальная картина звуковых полей в конструкциях и помещениях, коэффициенты передачи звука от одного элемента к другому определяются приближенно, без учета физики процесса.

Решить задачу о вкладе каждого пути передачи звука можно на основе метода статистического энергетического анализа (СЭА). В классической постановке метод СЭА при определении коэффициентов энергетической связи учитывает только резонансные формы прохождения звука, пренебрегая нерезонансными. Данное упущение может привести к значительным ошибкам при прогнозировании передачи звука.

Наиболее полный анализ прохождения звука через однослойные и двухслойные перегородки можно выполнить на основе теории самосогласования волновых полей М.С. Седова [6]. Этот метод позволяет учесть все формы прохождения звука в расчете СЭА. Альтернативный подход к представлению задачи звукоизлучения и звукоизоляции панелей конечных размеров дан в работах F. Fahy [5] и др. Нерезонансное прохождение звука через конструкции рассмотрено в работах F.G. Leppington [8] и R.J.M. Craik [9].

В настоящей работе расчеты распространения звука выполнены методом СЭА, в котором в уравнениях энергетического баланса учтены коэффициенты энергетической связи, учитывающие нерезонансную звукопередачу из смежных акустических подсистем. Расчет инерционного коэффициента звукопередачи выполнен методом М.С. Седова.

1. Методика исследования

1.1. Модель СЭА

Первым этапом использования СЭА является составление физической модели, в которой вся рассматриваемая система делится на подсистемы: конструктивные подсистемы (ограждающая панель), акустические подсистемы (воздушный объем). Для представления энергетической взаимосвязи подсистем в модели СЭА рассмотрим простейшие виброакустические системы:

- одна панель и два воздушных объема помещения (рис. 2);
- угловой стык панелей и два воздушных объема помещения (рис. 3);
- две панели и два воздушных объема помещения (рис. 4);
- три панели (третья панель образует с первой и второй панелью Г-образный стык) и два воздушных объема помещения (рис. 5).

Представим энергетическое взаимодействие ограждающих конструкций и помещений между собой в виде схем. Будем рассматривать усеченную модель СЭА, пренебрегая продольными и сдвиговыми волнами, учитывая лишь

энергию изгибных волн в конструкциях [10], что оправданно для систем с малым числом подсистем.

Для номера помещений, которые мы будем рассматривать, примем нижние индексы I и II, а для панелей, которые обмениваются энергией полями изгибных волн, примем нижние индексы 1, 2 и 3. С помощью последовательности взятых индексов определим направление потока энергии. Верхние индексы показывают тип волнового поля в элементах модели, A – это акустическое поле в самом помещении, b – поля изгибных волн в панелях. На схемах W_1, W_2, W_3, W_I и W_{II} – энергии в подсистемах, P_1, P_2, P_3, P_I и P_{II} – мощности внешних источников, поступающие в подсистемы, $P_{1,diss}, P_{2,diss}$ и $P_{3,diss}$ – мощности потерь в подсистемах на диссипацию, $P_{12}, P_{21}, P_{23}, P_{32}$ и $P_{13}, P_{31}, P_{I,II}, P_{II,I}$ – мощности энергетического обмена между подсистемами.

Мощности, теряемые подсистемами на диссипацию, можно записать в виде

$$P_{i,diss}^b = \omega \cdot \eta_i^b \cdot W_i^b, \quad (1)$$

где η_i^b – коэффициент внутренних потерь в подсистемах при распространении изгибных волн; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, принимаемая как среднегеометрическая частота третьоктавной или октавной полосы.

Теперь запишем уравнения энергетического баланса для панели и двух акустических подсистем (рис. 2) с учетом коэффициентов энергетической связи между помещениями, учитывающих нерезонансную звукопередачу:

$$P_I^A = \omega(\eta_I^A + \eta_{I1}^{Ab} + \eta_{I,II}^{AA})W_I^A - \omega \cdot \eta_{I1}^{bA} \cdot W_1^b, \quad (2)$$

$$P_{II}^A = \omega(\eta_{II}^A + \eta_{II1}^{Ab} + \eta_{II,I}^{AA})W_{II}^A - \omega \cdot \eta_{II1}^{bA} \cdot W_1^b, \quad (3)$$

$$P_1^b = \omega(\eta_1^b + \eta_{1I}^{bA} + \eta_{1II}^{bA})W_1^b - \omega(\eta_{1I}^{Ab} \cdot W_I^A + \eta_{1II}^{Ab} \cdot W_{II}^A). \quad (4)$$

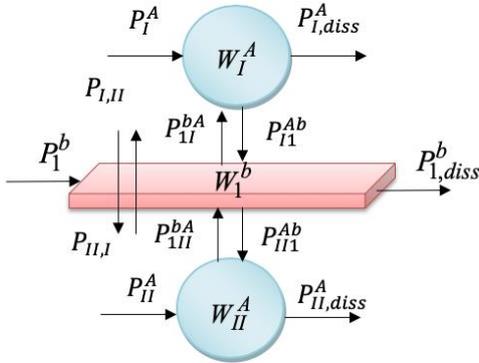


Рис. 2. Схема энергообмена между двумя акустическими и одной конструктивной подсистемами

Запишем уравнения энергетического баланса для каждой из двух акустических подсистем и двух панелей (рис. 3):

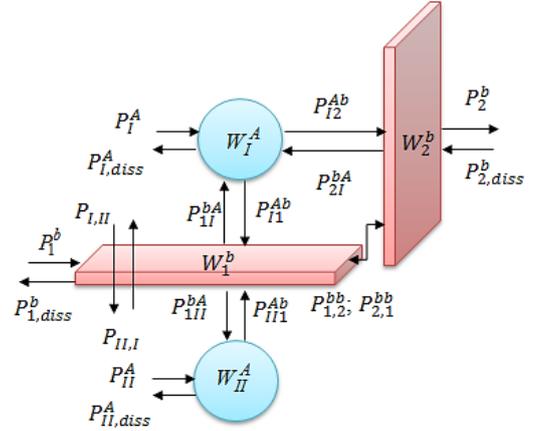
$$P_I^A = \omega(\eta_I^A + \eta_{I1}^{Ab} + \eta_{I2}^{Ab} + \eta_{I,II}^{AA})W_I^A - \omega(\eta_{1I}^{bA} \cdot W_1^b + \eta_{2I}^{bA} \cdot W_2^b), \quad (5)$$

$$P_{II}^A = \omega(\eta_{II}^A + \eta_{II1}^{Ab} + \eta_{II,I}^{AA})W_{II}^A - \omega \cdot \eta_{1II}^{bA} \cdot W_1^b, \quad (6)$$

$$P_1^b = \omega(\eta_1^b + \eta_{11}^{bA} + \eta_{12}^{bb})W_1^b - \omega(\eta_{11}^{Ab} \cdot W_1^A + \eta_{21}^{bb} \cdot W_2^b + \eta_{11}^{Ab} \cdot W_{II}^A), \quad (7)$$

$$P_2^b = \omega(\eta_2^b + \eta_{21}^{bA} + \eta_{22}^{bb})W_2^b - \omega(\eta_{12}^{Ab} \cdot W_1^A + \eta_{12}^{bb} \cdot W_1^b). \quad (8)$$

Рис. 3. Схема энергообмена между двумя акустическими и двумя конструктивными подсистемами



Запишем уравнение энергетического баланса для двух панелей и двух акустических подсистем (рис. 4):

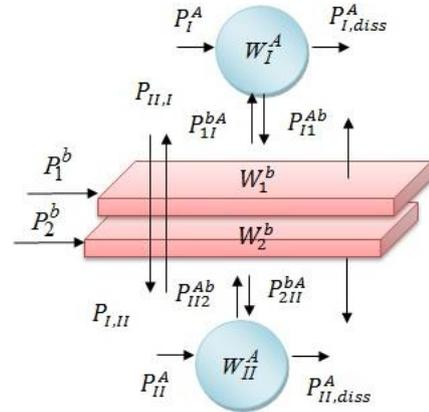
$$P_I^A = \omega(\eta_I^A + \eta_{I1}^{Ab} + \eta_{I,II}^{AA})W_I^A - \omega(\eta_{11}^{bA} \cdot W_1^b), \quad (9)$$

$$P_{II}^A = \omega(\eta_{II}^A + \eta_{II2}^{Ab} + \eta_{II,I}^{AA})W_{II}^A - \omega(\eta_{21}^{bA} \cdot W_2^b), \quad (10)$$

$$P_1^b = \omega(\eta_1^b + \eta_{11}^{bA} + \eta_{12}^{bb})W_1^b - \omega(\eta_{11}^{Ab} \cdot W_I^A + \eta_{21}^{bb} \cdot W_2^b), \quad (11)$$

$$P_2^b = \omega(\eta_2^b + \eta_{21}^{bA} + \eta_{22}^{bb})W_2^b - \omega(\eta_{12}^{Ab} \cdot W_I^A + \eta_{12}^{bb} \cdot W_1^b). \quad (12)$$

Рис. 4. Схема энергообмена между двумя акустическими и двумя конструктивными подсистемами



Уравнения энергетического баланса для каждой панели и двух акустических подсистем (рис. 5):

$$P_I^A = \omega(\eta_I^A + \eta_{I1}^{Ab} + \eta_{I3}^{Ab} + \eta_{I,II}^{AA})W_I^A - \omega(\eta_{11}^{bA} \cdot W_1^b + \eta_{31}^{bA} \cdot W_3^b), \quad (13)$$

$$P_{II}^A = \omega(\eta_{II}^A + \eta_{II2}^{Ab} + \eta_{II,I}^{AA})W_{II}^A - \omega \cdot \eta_{21}^{bA} \cdot W_2^b, \quad (14)$$

где $\rho \cdot c_0 = 410 \text{ Н с/м}^3$ – акустическое сопротивление воздуха (ρ – плотность воздуха, $c_0 = 344 \text{ м/с}$ – скорость звука в воздухе); ρ_i и h_i – объемная масса и толщина i -й конструкции; σ_i – коэффициент излучения.

Коэффициент энергетической связи от воздушного объема в панели η_{ki}^{Ab} может быть найден через обратный коэффициент η_{ik}^{bA} , определяемый по формуле (20) в виде

$$\eta_{ki}^{Ab} \cdot n_k^A = \eta_{ik}^{bA} \cdot n_i^b, \quad (21)$$

где n_k^A – плотность собственных форм колебаний (модальная плотность) в помещении k ; n_i^b – плотность собственных форм изгибных колебаний в панели [10].

Коэффициенты энергетической связи между помещениями (из помещения в помещение) предлагается определять через инерционный коэффициент прохождения через перегородку по формуле [9] в виде

$$\eta_{I,II} = \frac{c_0 \cdot S \cdot \tau_{I,II}}{8 \cdot \pi \cdot f \cdot V}, \quad (22)$$

где S – площадь поверхности; $\tau_{I,II}$ – инерционный коэффициент прохождения.

Инерционный коэффициент прохождения звука для однослойной конструкции будем вычислять по формуле М.С. Седова [6]

$$\tau_{I,II} = \tau_{и} = \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{m'^2 f^2 \cos \theta_{cp} \cos \theta_{2и}}{F_{и,ср}^2} + 1, \quad (23)$$

где $\theta_{2и}$ – угол излучения звука инерционными волнами; $F_{и,ср}^2$ – функция отклика.

А для двухслойной перегородки по формуле [6]

$$\tau_{I,II} = \tau_{пи} + \tau_{1и} \cdot \tau_{2и}, \quad (24)$$

где индекс «пи» означают прохождение звука через пластины с упругой связью между собой. При этом

$$\tau_{пи} = 1 / \left\{ \left[\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{m'^2 f^2}{F_{1и,ср}^2} \left(\frac{f^2}{f_0^2} - 1 \right)^2 \right] + 1 \right\}. \quad (25)$$

Здесь $m' = m_1 + m_2$, где $m_1 m_2$ – поверхностная первой и второй конструкции; $F_{1и}$ – функция отклика первой пластины, на которую падает звук [6]; f_0 – резонансная частота системы «масса – упругость – масса»:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d m_1 m_2}}, \quad (26)$$

где d – расстояние между пластинами, м.

Инерционное прохождение звука последовательно через первую и вторую пластины, разделенные воздушным промежутком, оценивается коэффициентами:

$$\tau_{1и} = 1 / \left(\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{m_1^2 f^2 \cos^2 \theta_1}{F_{1и,ср}^2} + 1 \right), \quad (27)$$

$$\tau_{2и} = 1 / \left(\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{m_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2и,ср}^2} + 1 \right), \quad (28)$$

где θ_2 – угол падения на вторую пластину звуковых волн, образующих формы собственных колебаний воздушного промежутка вдоль плоскостей пластин. В большинстве практически используемых конструктивных решений двойных ограждающих конструкций $\cos \theta_2 = d/\sqrt{a^2 + d^2}$ [6].

Акустическая мощность. В ряде случаев, включая случай натуральных измерений распространения шума и звуковой вибрации в здании, мощность источника можно оценить по измеренному или прогнозному уровню звукового давления L_{pk} в помещении с источником шума:

$$P_k^A = \frac{A_k}{4 \cdot 10^{12}} 10^{0.1 \cdot L_{pk}}, \quad (29)$$

где L_{pk} – уровень звукового давления, измеренный и усредненный по ряду точек в помещении; A_k – эквивалентное поглощение в помещении.

2. Результаты решения

Рассмотрим все вышеописанные схемы энергетического обмена между подсистемами (рис. 2–5). В качестве конструктивных подсистем будем рассматривать панели ГВЛ толщиной $h = 10$ мм, с размерами $a = 1$ м, $b = 0,8$ м ($\eta_i^b = 0,006$; $E_i = 5,8 \cdot 10^9$ МПа; $\rho_i = 1240$ Нс²/м⁴; $\mu_i = 0,3$; $i = 1, 2, 3$). А в качестве акустических подсистем помещения с объемами $V_I = 1,8$ м³ и $V_{II} = 4,6$ м³.

Первый пример. Рассмотрим систему, включающую в себя одну панель ГВЛ, и два воздушных объема помещения. Схема энергетического обмена между подсистемами изображена на рис. 2, уравнения энергетического баланса для данной системы (2) – (4). Расчет производился в программе Mathcad, результаты представлены на рис. 6 и 7.

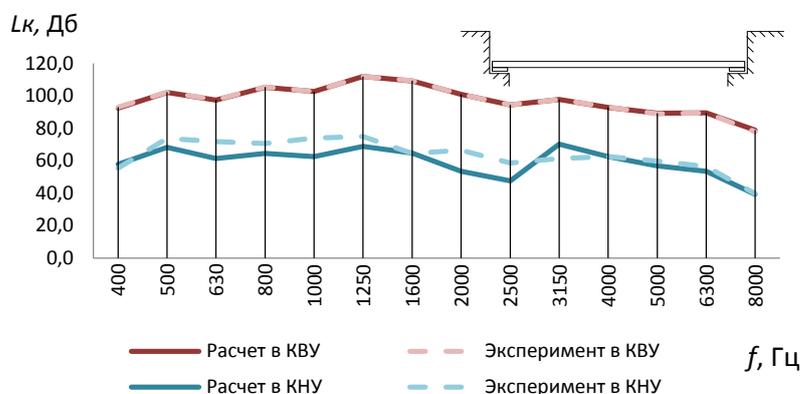


Рис. 6. Одна панель ГВЛ и два воздушных объема помещения (расчетная схема на рис. 2). Расчетные и измеренные уровни звукового давления

Второй пример. Рассмотрим систему из двух панелей ГВЛ, жестко соединенных в угловом стыке и двух воздушных объемов помещения. Схема энергетического обмена на рис. 3, уравнения энергетического баланса (5) – (8). Результаты расчетов представлены на рис. 8–10.

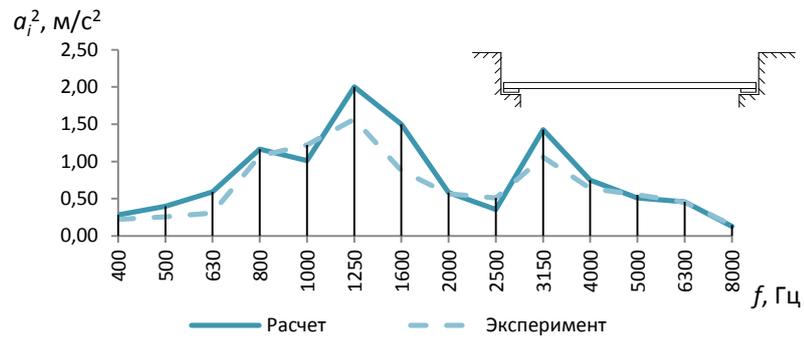


Рис. 7. Одна панель ГВЛ и два воздушных объема помещения (расчетная схема на рис. 2). Расчетные и измеренные виброускорения на панели ГВЛ

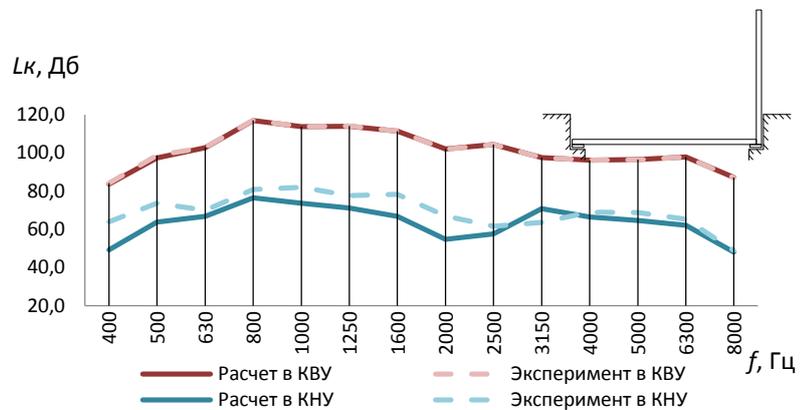


Рис. 8. Две панели из ГВЛ, жестко соединенные в угловом стыке, два воздушных объема (расчетная схема на рис. 3). Расчетные и измеренные уровни звукового давления

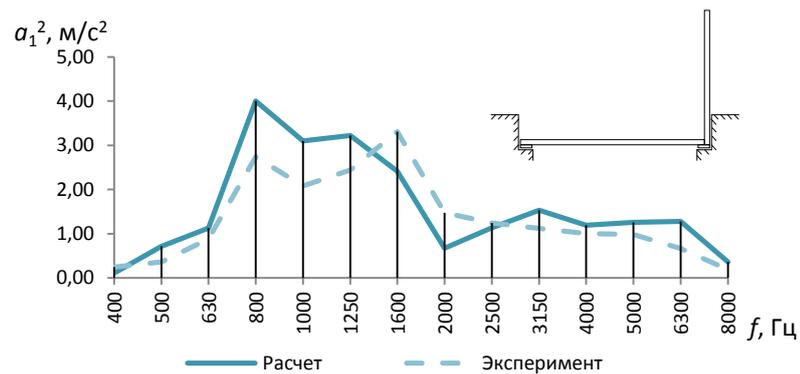


Рис. 9. Две панели из ГВЛ, жестко соединенные в угловом стыке, два воздушных объема (расчетная схема на рис. 3). Расчетные и измеренные виброускорения на панели № 1

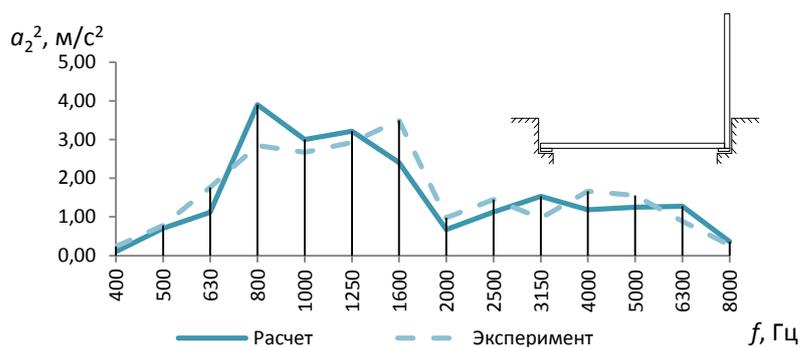


Рис. 10. Две панели из ГВЛ, жестко соединенные в угловом стыке, два воздушных объема (расчетная схема на рис. 3). Расчетные и измеренные виброускорения на панели № 2

Третий пример. Рассмотрим систему из двух панелей ГВЛ с воздушным промежутком между ними $d = 0,04$ м, жестко соединенных между собой, и двух воздушных объемов помещения. Схема энергетического обмена на рис. 4, уравнения энергетического баланса (9) – (12). Результаты расчетов представлены на рис. 11 и 12.

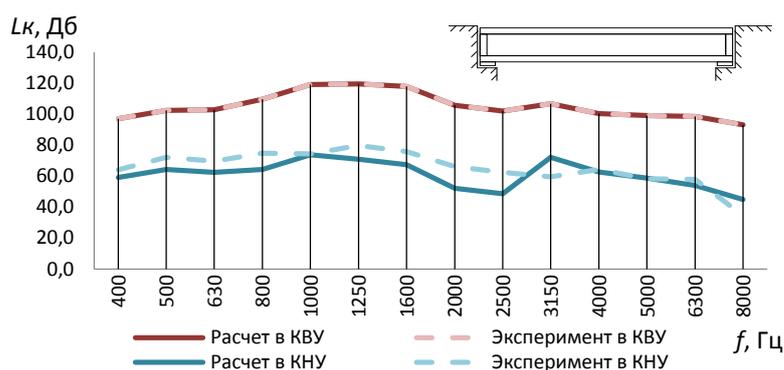


Рис. 11. Две панели ГВЛ с воздушным промежутком $d = 0,04$ м, жестко соединенные между собой (расчетная схема на рис. 4). Расчетные и измеренные уровни звукового давления

Четвертый пример. Рассмотрим систему из трёх панелей ГВЛ (третья панель образует с первой и второй панелью Г-образный стык) и двух воздушных объемов помещения. Схема энергетического обмена на рис. 5, уравнения энергетического баланса (13) – (17). Результаты расчетов представлены на рис. 13 и 14.

Уравнения энергетического баланса в целом дают систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных энергий волн в подсистемах $W_1^b, W_2^b, W_3^b, W_1^A, W_{II}^A$. Расчет неизвестных энергий волн для каждой схемы производился в программе Mathcad.

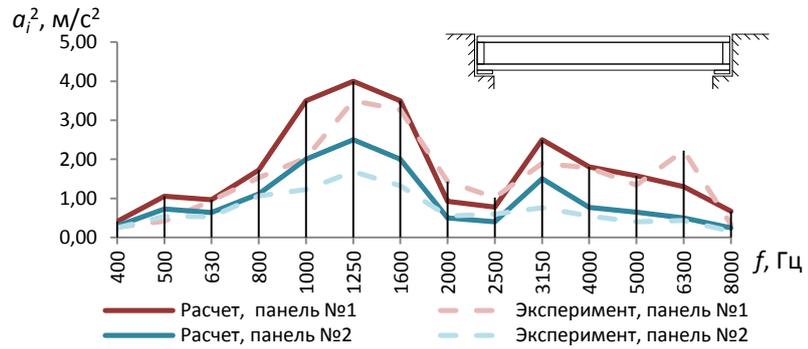


Рис. 12. Две панели ГВЛ с воздушным промежутком $d = 0,04$ м, жестко соединенные между собой (расчетная схема на рис. 4). Расчетные и измеренные виброускорения на панелях

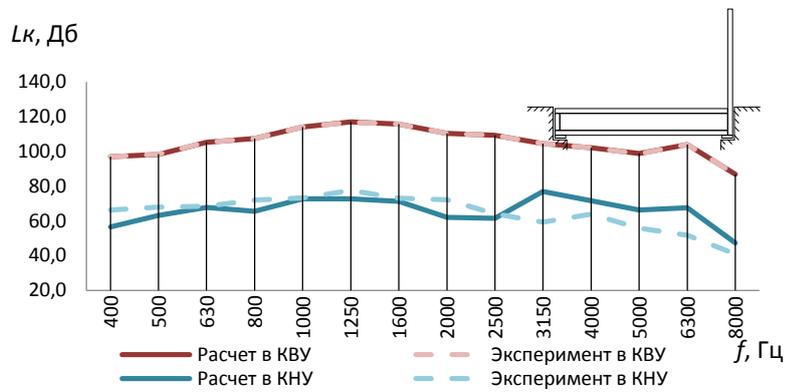


Рис. 13. Три панели из ГВЛ, жестко соединенные в угловом стыке, два воздушных объема (расчетная схема на рис. 5). Расчетные и измеренные уровни звукового давления

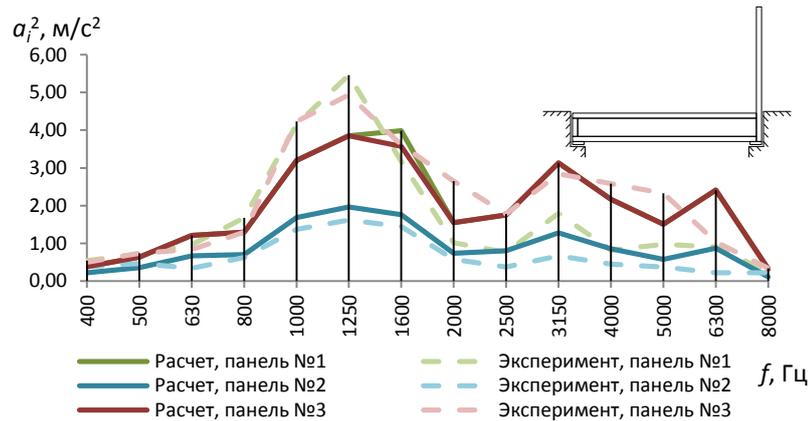


Рис. 14. Три панели из ГВЛ, жестко соединенные в угловом стыке, два воздушных объема. Расчетные и измеренные виброускорения на панелях

Для определения звукоизоляции помещений находятся уровни интенсивности звука в них:

$$L_k = 10 \lg \frac{W_k^A \cdot c_0}{P_0 \cdot V_k}, \quad (30)$$

где $P_0 = 10^{-12}$ Вт – пороговое значение мощности; V_k – объем k -го помещения, м³.

Среднеквадратичное виброускорение можно получить по формуле

$$a_i^2 = \frac{\omega^2 \cdot W_i^b}{\rho_i \cdot h_i \cdot S_i}, \quad (31)$$

где ρ_i , h_i и S_i – соответственно плотность материала, толщина и площадь i -й панели.

3. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования были проведены в малых акустических камерах Томского государственного архитектурно-строительного университета, которые имеют два смежных помещения: помещение с источником звука – камера высокого уровня (КВУ) объемом 1,8 м³ и изолируемое – камера низкого уровня (КНУ) объемом 4,6 м³. Возбуждающий тракт включал звуковой генератор 04003, усилитель мощности LV-103 и громкоговоритель, измерительный тракт включал микрофон в каждой камере, шумомер «Октава», анализаторы спектра ZET 017-U8 и акселерометры BC-111 со встроенной электроникой стандарта ICP (SMA-BNC).

Испытуемая конструкция, состоящая из одного листа ГВЛ, монтировалась в проем между камерами. Для второго блока испытаний устанавливался второй лист ГВЛ, образующий с первым листом Г-образный стык. Далее монтировалась испытуемая конструкция из двух листов ГВЛ. Для последнего блока испытаний устанавливался третий лист ГВЛ, образующий с первым и вторым листом Г-образный стык.

Уровни звукового давления (L_k , дБ) в измерительных камерах и виброускорения на панелях (a_i , дБ) производились и усреднялись в соответствии с требованиями [14].

По данным измерений построены графики виброускорения и уровня звукового давления от шума.

Заключение

В целях уточнения методики расчета звукоизоляции ограждающих конструкций с учетом структурной звукопередачи на основе метода статистического энергетического анализа рассмотрены примеры теоретических решений простейших виброакустических задач с малым количеством элементов системы. Разработаны их физические модели, составленные из помещений и ограждающих их конструкций. Помещения рассмотрены как акустические подсистемы, имеющие энергию, равномерно распределенную между резонансными модами колебаний. Конструкции рассмотрены как конструктивные подсистемы с учетом лишь энергии изгибных волн в конструкциях, что оправданно для систем с малым числом подсистем.

Определены основные параметры статистической энергетической модели, приведены основные расчетные формулы для их вычисления. Коэффици-

енты энергетической связи между помещениями предлагается определять через инерционный коэффициент прохождения через перегородку.

Как видим из графиков, результаты измерения параметров звука и вибрации для простейших виброакустических систем показывают близкие значения с результатами виброакустического расчета. Полученные результаты позволяют использовать представленную методику для решения более сложных виброакустических задач о распространении звука и вибрации, в том числе и в натурных фрагментах реальных зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Осипов Г.Л.* Шумы и звукоизоляция. М. : Стройиздат, 1967. 104 с.
2. *Заборов В.И., Лалаев Э.М., Никольский В.Н.* Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. М. : Стройиздат, 1979. 254 с.
3. *Заборов В.И., Могилевский М.И., Мякишин В.Н., Самойлюк Е.П.* Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / под ред. В.И. Заборова. Киев : Будивельник, 1989. 160 с.
4. *Боголепов И.И.* Промышленная звукоизоляция. Л. : Судостроение, 1986. 368 с.
5. *Fahy F.J.* Sound and structural vibration. Radiation, transmission and response. London : Academic press, 1985. 309 p.
6. *Седов М.С.* Теория инерционного прохождения звука через ограждающие конструкции // Строительство и архитектура. 1990. № 2. С. 37–42.
7. *ГОСТ Р ЕН 12354-1:2012.* Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Ч. 1. Звукоизоляция воздушного шума между помещениями.
8. *Leppington F.G., Heron K.H., Broadbent E.G., Mead S.M.* Resonant and Non-Resonant Acoustic Properties of Elastic Panels. II. The Transmission Problem // Proceedings of the Royal Society of London. 1987. № 412. С. 309–337.
9. *Craik R.J.M., Smith R.S.* Sound transmission through double leaf lightweight partitions part I: airborne sound // Applied Acoustics. 2000. № 61. С. 223–245.
10. *Овсянников С.Н.* Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. Томск : Изд.-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2000. 378 с.
11. *Heckl M.* Measurement of absorption coefficients on plates // J. of the Acoustical Society of America. 1962. № 34. P. 803–808.
12. *Овсянников С.Н., Лелюга О.В.* Расчет виброизоляции углового стыка двухслойных панелей // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VIII Международной научно-практической конференции. 2018. Ч. 1. С. 403–411.
13. *Cremer L., Heckl M., Ungar E.* Structure-borne sound [Shum rasprostranyayushchiysya po konstrukciyam]. Berlin: Springer Verlag, 1973. 528 p.
14. *ГОСТ 27296–2012.* Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2014.

REFERENCES

1. *Osipov G.L.* Shумы i zvukoizoljacija [Noises and sound insulation]. Moscow: Stroyizdat, 1967. 104 p. (rus)
2. *Zaborov V.I., Lalaev E.M., Nikolski V.N.* Zvukoizoljacija v zhilyh i obshhestvennyh zdaniyah [Sound insulation in residential and public houses]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 254 p. (rus)
3. *Zaborov V.I., Mogilevskiy M.I., Myakshin V.N., Samoilyuk E.P.* Spravochnik po zashhite ot shuma i vibracii zhilyh i obshhestvennyh zdaniy [Handbook on residential and public buildings protection against noise and vibration]. Kiev: Budivjel'nik, 1989. 160 p. (rus)
4. *Bogolepov I.I.* Promyshlennaja zvukoizoljacija [Industrial sound insulation]. Leningrad: Sudostroenie, 1986. 368 p. (rus)

5. *Fahy F.J.* Sound and structural vibration. Radiation, transmission and response. London: Academic press, 1985. 309 p.
6. *Sedov M.S.* Teoriya inertsiionnogo prokhozheniya zvuka cherez ograzhdayushchie konstruksii [Theory of inertial passage of sound through enclosing structures]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1990. No. 2. Pp. 37–42. (rus)
7. *SNiP P EH 12354-1:2012.* Metody rascheta akusticheskikh kharakteristik zdaniy po kharakteristikam ikh elementov. Ch. 1. Zvukoizolyatsiya vozdušnogo shuma mezhdu pomeshcheniyami [Methods for calculating acoustic characteristics of buildings using characteristics of their elements. Part 1. Sound insulation of air noise between rooms]. (rus)
8. *Leppington F.G., Heron K.H., Broadbent E.G., Mead S.M.* Resonant and Non-resonant acoustic properties of elastic panels. II. The transmission problem. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1987. No. 412. Pp. 309–337.
9. *Craik R.J.M., Smith R.S.* Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: Airborne sound. *Applied Acoustics*. 2000. No. 61. Pp. 223–245.
10. *Ovsyannikov S.N.* Rasprostraneniye zvukovoy vibratsii v grazhdanskikh zdaniyakh [Propagation of sound vibration in civil buildings]. Tomsk: TSUAB, 2000. 378p. (rus)
11. *Heckl M.* Measurement of absorption coefficients on plates. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1962. No. 34. Pp. 803–808.
12. *Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V.* Raschet vibroizolyatsii uglovogo styka dvukhsloinykh panelei [Analysis of vibration insulation of angular joint of two-layer panels]. In: Pt 1. Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak material'nyi bazis modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya ekonomiki: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (*Proc. 8th Int. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*). 2018. Pp. 403–411. (rus)
13. *Cremer L., Heckl M., Ungar E.* Shum rasprostranyayushchisya po konstrukciyam [Structure-borne sound]. Berlin: Springer Verlag, 1973. 528 p.
14. *SNiP 27296–2012.* Zdaniya i sooruzheniya. Metody izmereniya zvukoizolyatsii ograzhdayushchikh konstruksii. Standartinform [Buildings and constructions. Measurement methods for sound insulation of enclosing structures. Moscow: Standartinform], 2014. (rus)

Сведения об авторах

Лелюга Ольга Владимировна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Olga.startseva27@gmail.com

Author Details

Olga V. Lelyuga, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Olga.startseva27@gmail.com