УДК 534.833.522.4

О РЕГУЛИРОВАНИИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЛОИСТЫХ ВИБРОДЕМПФИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ON THE REGULATION OF SOUND INSULATION LAMINATED VIBRODAMPING ELEMENTS

А.А. КОЧКИН, И.Л. ШУБИН, Н.А. КОЧКИН, А.В. КИРЯТКОВА
A.A. KOCHKIN, I.L. SHUBIN, N.A. KOCHKIN, A.V. KIRYATKOVA

(Вологодский государственный университет,
Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук)
(Vologda State University,
Research Institute of Building Physics
of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)
E-mail: vol.nikit@inbox.ru; pgs-vgu@mail.ru

Рассматривается влияние параметров слоистого вибродемпфированного элемента на звукоизоляцию. Показана зависимость звукоизоляции слои-

стого вибродемпфированного элемента коэффициента потерь и модуля упругости вибропоглощающего слоя.

Discusses the influence of parameters of the layered vibrodamping element for sound insulation. The dependence of sound insulation of layered vibrodamping element loss factor and elastic modulus of the vibration damping layer.

Ключевые слова: звукоизоляция, слоистый вибродемпфированный элемент, коэффициент потерь, модуль упругости.

Keywords: soundproofing, layered vibrodamping element, the loss factor, the modulus of elasticity.

Для снижения шума в настоящее время разработаны эффективные строительно-акустические методы, в том числе и метод звукоизоляции [1…7]. Звукоизоляция ограждений является наиболее рациональным способом снижения шума, проникающего в помещения как из смежных объемов, так и снаружи здания. В то же время использование традиционных методов звукоизоляции связано с увеличением массы ограждения и соответственно с необходимостью увеличения несущей способности конструкций зданий. Последнее ведет к удорожанию их строительства. Требуется разработка новых конструкций, обладающих необходимой звукоизоляцией и имеющих при этом небольшую поверхностную массу. К таким конструкциям относятся легкие ограждения из слоистых элементов. Более высокая акустическая эффективность таких конструкций может быть обеспечена за счет использования в их составе элементов со слоями из вибродемпфирующих материалов, повышающих конструктивные коэффициенты потерь в этих элементах.

Для разработки акустически эффективных легких ограждений с вибродемпфирующими элементами, обладающих требуемой звукоизолирующей способностью, необходимы надежные методы оценки влияния параметров элементов и материалов слоистых конструкций на их звукоизоляцию, теоретическое и методологическое обеспечение их проектирования, а также достаточный объем экспериментальных исследований звукоизоляции отдельных слоистых элементов и легких ограждений в целом.

Снижение поверхностной плотности звукоизолирующих ограждающих конструкций является одной из важнейших задач в области разработки конструкций, используемых для снижения шума методом звукоизоляции. К настоящему времени предложены различные легкие ограждающие конструкции, состоящие из слоев, соединенных между собой различными способами. Чаще всего применяются конструкции, соединенные между собой "насухо", например, конструкции фирмы ТИГИ КНАУФ. Выполненный нами анализ показывает, что существуют значительные резервы повышения звукоизоляции таких конструкций за счет увеличения конструктивного коэффициента потерь в отдельных элементах и соответственно в целом в этих конструкциях.

В связи с этим в работе предложены новые легкие ограждающие конструкции, состоящие из слоистых вибродемпфированных элементов (СВДЭ) различных конструктивных решений [8], [9].

Слоистые вибродемпфированные элементы представляют собой два и более жестких листа (стекла, металла, гипсокартона, гипсоволокна, фанеры, ЦСП, ОСП и др.), соединенных между собой промежуточными вибродемпфирующими материалами (рис. 1 – слоистые вибродемпфированные элементы: 1 – жесткий слой (стекло, ГВЛ, ГКЛ, фанера и др.); 2 – вибродемпфирующий слой).

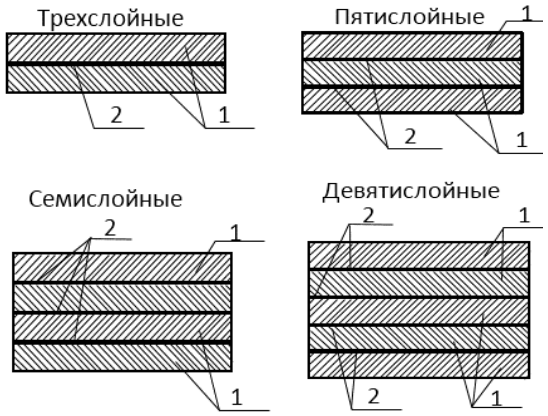

Рис. 1

В отличие от традиционных конструкций, применяемых для целей звукоизоляции, данные ограждения имеют высокий конструктивный коэффициент потерь и повышенную устойчивость.

Слоистые вибродемпфирующие конструкции на основе металла и специально разработанных вязкоупругих вибродемпфирующих материалов широко используются в практике борьбы с шумом и вибрациями, особенно в судо-, авиа- и автомобилестроении. Созданы высокоэффективные вибродемпфирующие материалы и конструкции. Все они успешно применяются для снижения вибрации.

Перечисленные выше конструктивные элементы используются на практике в основном для целей вибропоглощения и реже – для целей повышения звукоизоляции кожухов и других защитных устройств, применяемых при снижении шума машин и механизмов на транспорте и в других подобных отраслях.

В работе исследуются слоистые вибродемпфированные элементы и конструкции на основе этих элементов в качестве звукоизолирующих устройств. В качестве ВДМ используются широко выпускаемые наплавляемые гидроизоляционные материалы, смолы ультрафиолетового отвердения (для светопрозрачных конструкций), различные герметики, материалы на основе переработанных отходов полимеров. В отличие от конструкций для снижения вибрации, где ВДМ имеет очень высокий коэффициент потерь, для звукоизолирующих СВДЭ используются обычные материалы с меньшим коэффициентом потерь. Это связано с тем, что в области неполных пространственных резонансов и простых пространственных резонансов существует граничная величина эффективного коэффициента потерь СВДЭ, превышение которой не ведет к увеличению звукоизоляции.

Стекло, ГВЛ, ГКЛ, ЦСП, ОСП, фанера, металл и др. – это материалы для СВДЭ. СВДЭ – полуфабрикат, основа, из которой изготавливают легкие звукоизолирующие ограждающие конструкции с вибродемпфирующими слоями. СВДЭ и конструкции из них называются легкими, так как их поверхностная плотность (масса 1 $м^2$ ограждения), как правило, менее 100 $кг/м^2$ и граничная частота волнового совпадения $f_{гр}$ находится в нормируемом диапазоне частот. Для повышения звукоизоляции СВДЭ, состоящих из тонких жестких слоев, имеющих граничную частоту волнового совпадения в диапазоне высоких частот, необходимо смещать ее $f_{гр}$ в области более высоких частот, за пределы нормируемого частотного диапазона.

Оптимальным считается СВДЭ, удовлетворяющий требуемой звукоизоляции в определенном диапазоне частот при ее минимальной поверхностной плотности.

Звукоизоляция ограждений в различных частотных диапазонах зависит от поверхностной плотности μ и материала ограждения, характеризующегося толщиной отдельных слоев $h_{1,2}$ и h_3, размерами элемента a, b, динамическим модулем упругости слоев элемента $E_{1,2}$ и E_3, коэффициентом Пуассона $\upsilon_{1,2}$ и υ_3, коэффициентом потерь вибродемпфирующего материала η, а в СВДЭ также модулем сдвига G вибродемпфирующего слоя, ослаблением или усилением, симметричным или асимметричным расположением наружных слоев элемента.

Из дифференциального уравнения движения трехслойного элемента определена величина скорости распространения упругих волн:

$$c_u^6 c_s^2 + c_u^4 c_3^4 - c_u^2 c_2^4 c_S^2 - c_1^4 c_3^4 = 0. \quad (1)$$

Если принять в формуле (1) $c_2 = c_3$, что возможно при выполнении условия $h_1 = h_2 << h_3$, то выражение (1) по форме будет совпадать с уравнением Куртце, который в своих исследованиях трехслойных конструкций пользовался методами электроакустического моделирования.

Анализ уравнения (1) показывает, что весь диапазон исследуемых частот можно разделить на три области.

1. На низких частотах, когда $c_1 << c_s$, пренебрегая вторым и последним членами уравнения, будем иметь $c_u \approx c_3$, то есть в этой области частот в элементе образуются изгибные волны, и он колеблется как пластина с поверхностной массой μ и цилиндрической жесткостью N.

2. На высоких частотах $c_1 >> c_s$, пренебрегая первым и третьим членами, имеем $c_u \approx c_1$. Колебания элемента в основном определяются изгибными колебаниями обшивок, нагруженных массой среднего слоя.

3. В промежуточном диапазоне частот от $\omega_1 = \frac{S}{\sqrt{\mu N}}$ до $\omega_2 = \frac{S}{\sqrt{\mu\left(F - \frac{TLh_3}{N}\right)}}$, где $c_s \approx c_u$, преимущественные значения будут иметь сдвиговые колебания заполнителя. Видно, что в случае вибродемпфирующего промежуточного слоя сдвиговые деформации играют существенную роль в формировании скорости упругих волн.

Известно, что скорость распространения сдвиговых волн не зависит от частоты, если она меньше скорости звука в воздухе. То есть волнового совпадения не произойдет, по меньшей мере, до частоты ω_2, и звукоизоляция трехслойного элемента будет определяться законом массы.

Из анализа дисперсионных кривых скоростей изгибных и сдвиговых волн, определенных при решении уравнения (1), получаем, что на низких частотах скорости c_u асимптотически приближаются к кривой c_3, на высоких частотах – к кривой c_1. В промежуточной области частот наблюдается некоторое выполаживание дисперсионной кривой c_u, которое объясняется влиянием волн сдвига среднего слоя.

Видно, что граничная частота волнового совпадения трехслойного элемента находится в районе граничной частоты однослойной пластины равной массы с цилиндрической жесткостью $\left(F - \frac{TLh_3}{N}\right)$.

В соответствии с изложенным при проектировании трехслойных ограждений, звукоизоляция которых во всем расчетном диапазоне частот определяется законом массы, необходимо выполнить два требования: скорость сдвиговых волн среднего слоя, нагруженного с обеих сторон массой обкладок, должна быть меньше скорости звука в воздухе $c_S < c_0$; граничная частота пластины с поверхностной массой μ и цилиндрической жесткостью $\left(F - \frac{TLh_3}{N}\right)$ должна лежать выше расчетного диапазона частот, то есть $\frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu N}{(FN - TLh_3)}} > f_{рас}$.

То есть в трехслойных элементах с промежуточным вибродемпфирующим слоем сдвиговые деформации дают существенный вклад в суммарное волновое синусоидальное движение элемента в широкой области частот. При этом следует стремиться к тому, чтобы скорость волн с преимущественным вкладом сдвига в среднем слое, нагруженном с обеих сторон массой обкладок, была меньше скорости звука в воздухе. Следует также стремиться к тому, чтобы граничная частота волнового совпадения некоторой условной пластины со скоростью c_1 лежала выше расчетного диапазона частот.

Звукоизоляция слоистых вибродемпфированных элементов в значительной мере зависит от коэффициента потерь и динамического модуля упругости вибро-

демпфирующего слоя [10], [11]. На рис. 2 показаны частотные характеристики звукоизоляции двух ограждений, состоящих из двух наружных листов силикатного стекла по 3,0 мм и прослойки из нафталана толщиной 1,0 мм с разницей при измерениях в 5 лет по сравнению с однослойным стеклом, равным по поверхностной плотности слоистым (1 – измеренные в начале эксплуатации, R_W=34 дБ; 2 – измеренные через 5 лет эксплуатации, R_W=33дБ; 3 – стекло толщиной 6 мм, R_W=28 дБ; 4 – закон массы).

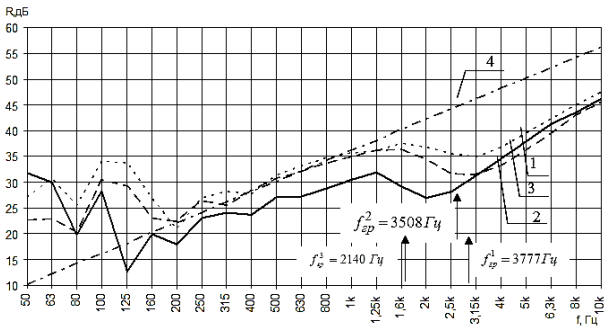

Рис. 2

Видно, что снижение коэффициента потерь и повышение динамического модуля упругости привело к снижению звукоизоляционных качеств конструкций и смещению граничной частоты волнового совпадения в область более низких частот. Так, для элемента, состоящего из двух листов силикатного стекла толщиной по 3мм и прослойки из нафталана толщиной 1мм, за 5 лет динамический модуль упругости нафталана увеличился с $3{,}3\cdot10^7$ до $6{,}7\cdot10^7$ Па, а граничная частота волнового совпадения снизилась с 3777 до 3508 Гц. В то же время это снижение звукоизоляции не превышает 1…2 дБ, то есть слоистые светопрозрачные элементы могут эксплуатироваться достаточно продолжительное время в качестве звукоизолирующих конструкций без существенного снижения их звукоизоляции.

В отличие от слоистых конструкций, которые используются для снижения вибрации, где вибропоглощающий материал должен иметь высокий коэффициент потерь, для легких ограждающих элементов с листами из ГВЛ, используемых в качестве звукоизолирующих конструкций, могут применяться в качестве вибродемпфирующего слоя обычные материалы с меньшим коэффициентом потерь. Это связано с тем, что в области неполных пространственных резонансов и в области простых пространственных резонансов существует предельная величина коэффициента потерь, дальнейшее повышение которой не ведет к увеличению звукоизоляции [12].

У легких слоистых вибродемпфированных элементов с поверхностной плотностью менее 100 кг/м^2 граничная частота волнового совпадения $f_{гр}$, как правило, находится в нормируемом диапазоне частот. Поэтому для повышения звукоизоляции конструкций из таких элементов необходимо смещать граничную частоту волнового совпадения в область более высоких частот за пределы нормируемого частотного диапазона. Это возможно путем регулирования величиной динамического модуля упругости вибродемпфирующего слоя.

Ниже рассмотрено влияние коэффициента потерь и динамического модуля упругости вибродемпфирующего слоя на звукоизоляцию слоистых вибродемпфированных элементов, состоящих из двух листов ГВЛ толщиной по 10 мм с промежуточным слоем из техноэласта толщиной 3 мм.

Коэффициенты потерь и динамические модули упругости ГВЛ толщиной 10 мм и техноэласта различной толщины исследованы в соответствии с ГОСТом 16297–80 на образцах размером от 10×10 см до 1,23×1,11 м на вибростенде в подвешенном состоянии и в проеме реверберационных камер с гипсовой заделкой по контуру, то есть в качестве конструкции.

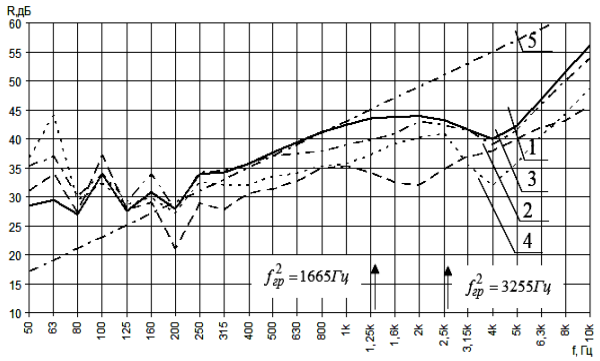

Рис. 3

На рис. 3 представлены частотные характеристики звукоизоляции слоистого элемента, состоящего из двух слоев ГВЛ толщиной по 10 мм (1 – склеенных одним слоем техноэласта толщиной 3 мм, μ =28,5 кг/м^2, R_W=41 дБ; 2 – склеенных эпоксидной смолой, μ =24,33 кг/м^2, R_W=33 дБ; 3 – склеенных элабитом, μ =26,6 кг/м^2, R_W=40 дБ; 4 – без склеивания, μ =23,30 кг/м^2, R_W=37 дБ; 5 – закон массы). Из рис. 3 видно, что использование вибродемпфирующего слоя из техноэласта (η=0,03 и $E_д$=2,1·10^7 Па) по сравнению с вибродемпфирующим слоем из эпоксидной смолы (η=0,01 и $E_д$=3,3·10^8 Па) в конструкции трехслойного элемента приводит к повышению звукоизоляции 1-го элемента (рис. 3) по сравнению со 2-м элементом за счет более высокого коэффициента потерь и смещения граничной частоты волнового совпадения в область более высоких частот (смещение граничной частоты с 1665 до 3256 Гц за счет уменьшения динамического модуля упругости).

ВЫВОДЫ

1. На звукоизоляцию слоистых вибродемпфированных элементов существенное влияние оказывает коэффициент потерь вибродемпфирующего слоя и динамический модуль упругости этого материала. Путем соответствующего подбора коэффициента потерь и динамического модуля упругости вибродемпфирующего материала можно обеспечить достаточное повышение звукоизоляции и в том числе за счет смещения граничной частоты волнового совпадения в область высоких частот и, возможно, за пределы нормируемого диапазона частот.

2. На звукоизоляцию слоистых вибродемпфированных элементов из ГВЛ, ГКЛ и фанеры существенное влияние оказывает толщина листов. Величина этого влияния зависит от соотношения изгибной жесткости листов и их поверхностной плотности. Поэтому при проектировании звукоизоляции таких конструкций необходимо целенаправленно подбирать толщину элементов, исходя из их поверхностной плотности и динамического модуля упругости.

3. Установлено, что конструкция из слоистых вибродемпфированных элементов имеет большую звукоизоляцию, чем сплошные конструкции равной поверхностной плотности. Разница в звукоизоляции возрастает при общей массе конструкции с увеличением количества слоев многослойной конструкции. Выбор количества слоев многослойной конструкции определяется требованиями необходимой звукоизоляции и возможностями их конструктивных решений. При увеличении количества слоев элемента существенно возрастает сложность устройства элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лелюга О.В., Овсянников С.Н.* Исследование звукоизолирующей способности облегченных перегородок //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014, № 5 (46). С. 98…105.

2. *Овсянников С.Н., Самохвалов А.С.* Окна в раздельных переплетах с высокой теплозвукоизоляцией // Строительные материалы. – 2012, № 6. С.40…41.

3. *Бобылев В.Н., Тишков В.А., Гребнев П.А., Монич Д.В.* Резервы повышения звукоизоляции перегородок из пазогребневых гипсовых плит // Приволжский научный журнал. – 2015, № 4 (36). С.41…45.

4. *Гребнев П.А., Монич Д.В.* Исследование звукоизолирующих свойств многослойных ограждений с жестким заполнителем // Жилищное строительство. – 2012, № 6. С. 50…51.

5. *Антонов А.И., Леденев В.И., Соломатин Е.О., Шубин И.Л.* Расчет шума при проектировании звукоизолирующих кожухов технологического оборудования // Строительные материалы. – 2015, № 6. С. 39…41.

6. *Горин В.А., Клименко В.В.* Звукоизолирующие свойства материалов упругих подложек, применяемых в конструкциях паркетных полов // Кровельные и изоляционные материалы. – 2014, №4. С. 15…16.

7. *Горин В.А., Клименко В.В.* К оценке изоляции ударного шума междуэтажными перекрытиями с полами из древесных материалов // Вестник МГСУ. – 2011, № 3-1. С. 66…72.

8. Патент 106269 РФ. Звукоизолирующая панель с вибродемпфирующими слоями /А.А. Кочкин; заявл. 30.11.2010. Опубл. 10.07.2011. Бюл. №19.

9. Патент 108057 РФ. Двойная звукоизолирующая конструкция с обшивками из слоистых вибродемпфированных панелей /А.А. Кочкин,

Н.А.Кочкин; заявл. 26.04.2011. Опубл. 10.09.2011. – Бюл. № 25.

10. *Кочкин А.А.* Проектирование звукоизоляции слоистых вибродемпфированных панелей на основе гипсоволокнистых листов // Вестник МГСУ. – 2011. Т.1, № 3. С. 93…96.

11. *Кочкин А.А.* Исследование коэффициента потерь материалов и конструкций легких ограждений // Вестник МГСУ. – 2011. Т.1, № 3. С.366…370.

12. *Кочкин А.А.* О проектировании звукоизоляции легких ограждений с промежуточным вибродемпфирующим слоем // Academia. Архитектура и строительство. – 2010, №3. С.191…193.

R E F E R E N C E S

1. Leljuga O.V., Ovsjannikov S.N. Issledovanie zvukoizolirujushhej sposobnosti oblegchennyh peregorodok //Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2014, № 5 (46). S. 98…105.

2. Ovsjannikov S.N., Samohvalov A.S. Okna v razdel'nyh perepletah s vysokoj teplozvukoizoljaciej // Stroitel'nye materialy. – 2012, № 6. S.40…41.

3. Bobylev V.N., Tishkov V.A., Grebnev P.A., Monich D.V. Rezervy povyshenija zvukoizoljacii peregorodok iz pazogrebnevyh gipsovyh plit // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2015, № 4 (36). S.41…45.

4. Grebnev P.A., Monich D.V. Issledovanie zvukoizolirujushhih svojstv mnogoslojnyh ograzhdenij s zhestkim zapolnitelem // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2012, № 6. S. 50…51.

5. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin E.O., Shubin I.L. Raschet shuma pri proektirovanii zvukoizolirujushhih kozhuhov tehnologicheskogo oborudovanija // Stroitel'nye materialy. – 2015, № 6. S.39…41.

6. Gorin V.A., Klimenko V.V. Zvukoizolirujushhie svojstva materialov uprugih podlozhek, primenjaemyh v konstrukcijah parketnyh polov // Krovel'nye i izoljacionnye materialy. – 2014, №4. S. 15…16.

7. Gorin V.A., Klimenko V.V. K ocenke izoljashhii udarnogo shuma mezhdujetazhnymi perekrytijami s polami iz drevesnyh materialov // Vestnik MGSU. – 2011, № 3-1. S. 66…72.

8. Patent 106269 RF. Zvukoizolirujushhaja panel' s vibrodempfirujushhimi slojami /A.A. Kochkin; zajavl. 30.11.2010. Opubl. 10.07.2011. Bjul. №19.

9. Patent 108057 RF. Dvojnaja zvukoizolirujushhaja konstrukcija s obshivkami iz sloistyh vibrodempfirovannyh panelej /A.A. Kochkin, N.A.Kochkin; zajavl. 26.04.2011. Opubl. 10.09.2011. – Bjul. № 25.

10. Kochkin A.A. Proektirovanie zvukoizoljacii sloistyh vibrodempfirovannyh panelej na osnove gipsovoloknistyh listov // Vestnik MGSU. – 2011. T.1, №3. S. 93…96.

11. Kochkin A.A. Issledovanie kojefficienta poter' materialov i konstrukcij legkih ograzhdenij // Vestnik MGSU. – 2011. T.1, № 3. S.366…370.

12. Kochkin A.A. O proektirovanii zvukoizoljacii legkih ograzhdenij s promezhutochnym vibrodempfirujushhim sloem // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2010, №3. S.191…193.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 15.05.16.