УДК 699.844.69.825 DOI: 10.33979/2073-7416-2019-83-3-34-40

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ УДАРНОГО ШУМА МНОГОСЛОЙНЫМИ МЕЖДУЭТАЖНЫМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

ГОРИН В.А.[1], КЛИМЕНКО В.В.[1], ПОРОЖЕНКО М.А.[2]

[1]Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия
[2]Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия

Аннотация. *Предложен инженерный метод расчета изоляции ударного шума многослойными междуэтажными перекрытиями. В расчете учитывается влияние на звукоизоляцию цилиндрической жесткости и поверхностной плотности инерционных элементов, а также жесткости звукоизоляционных прокладочных материалов, что позволяет рационально проектировать перекрытия. Расчет сводится к вычислению частотной характеристики снижения уровня ударного шума за счет многослойной конструкции пола и к сравнению расчетного значения индекса приведенного уровня ударного шума с нормативными. Приведен перечень необходимых исходных данных и последовательность выполнения расчета. Даны формулы для определения границ частот собственных колебаний, в пределах которых вычисляют величину снижения приведенного уровня ударного шума. Изложена последовательность построения зависимости частот собственных колебаний системы и снижения уровня ударного шума многослойным междуэтажным перекрытием. Показано, что выше второй резонансной частоты собственных колебаний многослойного пола улучшение изоляции ударного шума (относительно однослойного перекрытия) составит 24 дБ на октаву в области низких частот и 12 дБ на октаву в области средних и высоких частот. Сравнение вычисленных и измеренных частотных характеристик снижения уровня ударного шума показало хорошее соответствие результатов полученных инженерным методом расчета с экспериментальными исследованиями.*

Ключевые слова*: изоляция ударного шума, многослойные междуэтажные перекрытия, инженерный метод расчета.*

ENGINEERING METHOD OF CALCULATION OF SOUND INSULATION LAYERED INTERFLOOR OVERLAPPINGS

GORIN V.A.[1], KLIMENKO V.V.[1], POROZHENKO M.A.[2]

[1]Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
[2]Research Institute of Construction Physics of RAACS, Moscow, Russia

Abstract. *The proposed engineering method of calculation of sound insulation of multilayer intercommunication pen-indoor. The calculation takes into account the effect on the sound insulation of cylindrical stiffness and surface density of inertial elements, as well as the stiffness of sound-proof gasket materials, which allows for rational design of the overlap. The calculation is reduced to the calculation of the frequency response of the impact noise reduction due to the multilayer structure of the floor and to the comparison of the calculated value of the index of the reduced level of impact noise with the standard. The list of necessary initial data and the validity of the calculation are given. Formulas are given to determine the boundaries of the natural oscillation frequencies within which the value of the reduced level of shock noise is calculated. The sequence of constructing the dependence of the natural oscillation frequencies of the system and reducing the level of shock noise by multi-layer inter-floor overlap is described. It is shown that above the second resonance frequency of the eigenfrequencies of the multilayer floor, the improvement of the shock noise isolation (relative to the single-layer overlap) is 24 dB per octave in the low frequency region and 12 dB per octave in the medium and high frequency region. Comparison of the calculated and measured frequency characteristics of the impact noise reduction showed a good agreement of the results obtained by the engineering calculation method with experimental studies.*

Keywords*: insulation of impact noise, multi-layered floor structures, engineering calculation method*

Одним из возможных путей улучшения технико-экономических показателей традиционных конструкций междуэтажных перекрытий с полами по упругим прокладкам является увеличение в них количества инерционных и упругих слоев, т.е. создание многослойных конструкций [2-5, 9-11].

В общем случае многослойное междуэтажное перекрытие состоит из чистого пола, основания пола, сплошных упругих прокладок, разделенных равномерно распределенным слоем материала с большим инерционным сопротивлением и несущей плиты. Реальность конструирования таких конструкций междуэтажных перекрытий вполне очевидна, однако, на практике они не встречались ввиду неисследованности вопроса [1,8,12-14].

Для применения новых конструкций в практике проектирования разработан инженерный метод расчета изоляции ударного шума многослойными перекрытиями. В расчете учитывается влияние на звукоизоляцию цилиндрической жесткости и поверхностной плотности инерционных элементов, а также жесткости упругих прокладок, что позволяет рационально проектировать перекрытия [2,6,7,14,15].

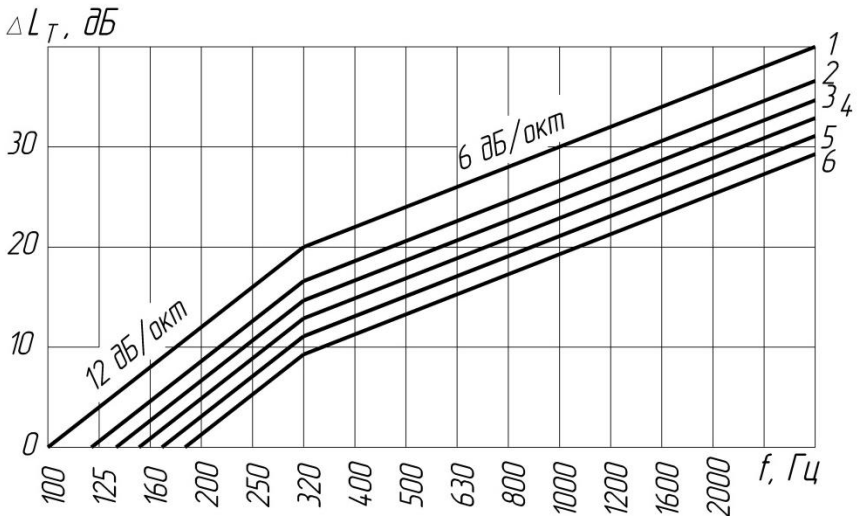

Рисунок 1 – Частотные характеристики требуемого снижения приведенного уровня ударного шума

Расчет изоляции ударного шума сводится к вычислению частотной характеристики снижения уровня ударного шума ΔL за счет многослойной конструкции пола и к сравнению расчетного значения ΔL с нормативным. Частотные характеристики требуемого снижения уровня ударного шума ΔL_T даны на рис. 1 для несущих конструкций перекрытий, указанных в табл. 1.

Таблица 1 – Значения индекса L_{nw0} приведенного уровня ударного шума под несущей плитой перекрытия и номер кривой ΔL_T на рис. 1.

Поверхностная плотность несущей плиты перекрытия, кг/м^2	Значения L_{nw0}, дБ	Номер требуемой кривой ΔL_T, на рис. 1
150	86	1
200	84	2
250	82	3
300	80	4
350	78	5
400	77	6

Расчет изоляции ударного шума многослойным междуэтажным перекрытием проводят в такой последовательности. Определяют поверхностные плотности (кг/м^2) элементов

перекрытия: несущей части P_1, упругих прокладок P_{c1} и P_{c2} (соответственно верхней и нижней), промежуточного инерционного слоя P_2 (при полах по лентам из упругих материалов P_{c1} и P_{c2} определяют, как для сплошных прокладок).

В соответствии с табл. 1 и рис. 1 устанавливают кривую требуемого снижения приведенного уровня ударного шума ΔL. Определяют частотную характеристику приведенного коэффициента жесткости упругих прокладок $K_{1,2}$ (Па/м) с учетом напряжения в них от полезной нагрузки верхней части пола P_1 промежуточного слоя материала P_2 и несущей части перекрытия P_3 [17]. Причем, на частотах 100-400 Гц принимается среднее значение $K_{1,2}$, а выше 400 Гц необходим учет изменения его величины на данных частотах [3, 15].

Находим частоту собственных колебаний верхней части пола и промежуточного слоя материала на соответствующих упругих основаниях по формулам:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_1}{P_1}} \text{ и } f_2 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_2}{P_2}}, \text{ (Гц)}$$

Определяют величину снижения приведенного уровня ударного шума на низких частотах в следующей последовательности:

– находят границы частот собственных колебаний перекрытия по формулам

$$\infty > x_1 \geq \sqrt{\frac{1}{2}\left[1+\lambda_2+\left(1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}\right]+\frac{1}{2}\sqrt{\left[1+\lambda_2+\left(1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}\right]^2-4\left(1+\lambda_1+\lambda_2\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}}}, \quad (1)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2}\left(1+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right)+\frac{1}{2}\sqrt{\left(1+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2-4\frac{f_1^2}{f_2^2}}} > x_2 \geq$$

$$\geq \sqrt{\frac{1}{2}\left[1+\lambda_2+\left(1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}\right]-\frac{1}{2}\sqrt{\left[1+\lambda_2+\left(1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}\right]^2-4\left(1+\lambda_1+\lambda_2\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}}}, \quad (2)$$

$$0 \le x_3 \le \sqrt{\frac{1}{2}\left(1+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right)-\frac{1}{2}\sqrt{\left(1+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right)^2-4\frac{f_1^2}{f_2^2}}}, \quad (3)$$

где $\lambda_1 = \frac{P_1}{P_3}$, $\lambda_2 = \frac{P_2}{P_3}$, $x_{123} = f_{123}^* / f_2$, f_{123}^* – частоты собственных колебаний перекрытия;

– в найденных границах определяют значения частот собственных колебаний перекрытия по формуле

$$\alpha = x_{123}\sqrt{\frac{x_{123}^4 - x_{123}^2\left[1+\lambda_2+\left(1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}\right]+\left(1+\lambda_1+\lambda_2\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}}{x_{123}^4 - x_{123}^2\left(1+\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right)+\frac{f_1^2}{f_2^2}}}, \quad (4)$$

где $\alpha_1 = f / f_2$, f – текущая частота;

– строится график этого уравнения. При построении графика по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладываются частоты α, а по оси ординат – величины частот собственных колебаний перекрытия x_{123};

– определяют величину ΔL снижения уровня ударного шума многослойным полом по формуле

$$\Delta L_1 = 20\lg|z_{123}|, \quad (5)$$

где
$$Z_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2}\left(x_2^2 - x_1^2\right)\left(x_3^2 - x_1^2\right), \tag{6}$$

$$Z_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2}\left(x_1^2 - x_2^2\right)\left(x_3^2 - x_2^2\right), \tag{7}$$

$$Z_3 = \frac{f_2^2}{f_1^2}\left(x_1^2 - x_3^2\right)\left(x_2^2 - x_3^2\right). \tag{8}$$

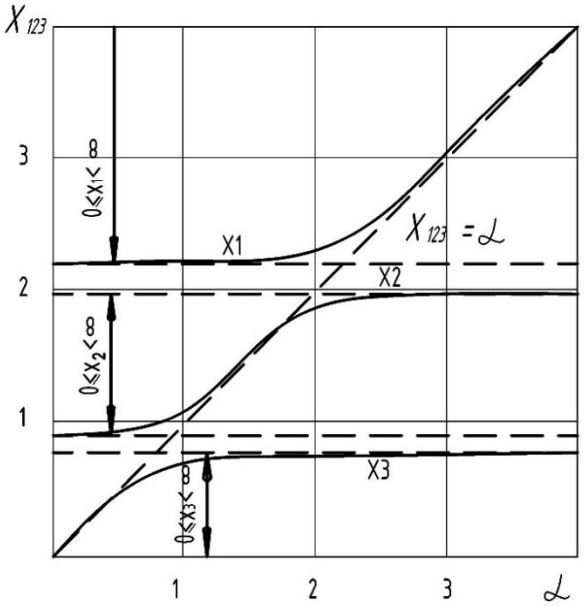

Рисунок 2 – Построение зависимости частот собственных колебаний системы x_{123} от α

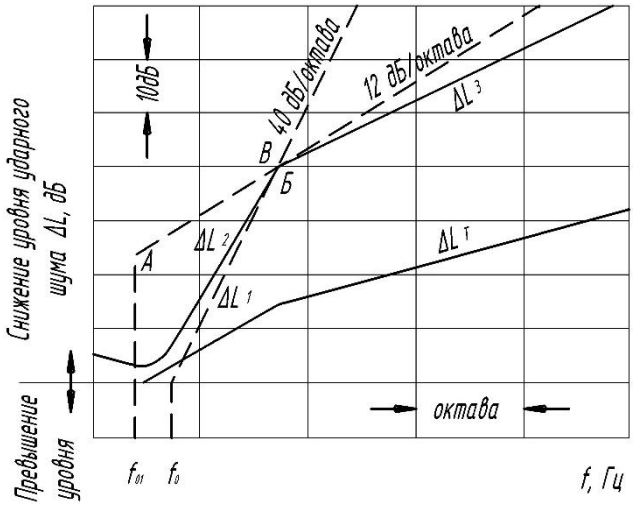

Рисунок 3 – Построение частотной характеристики снижения уровня ударного шума полом пятислойного перекрытия

В выражение (5) подставляется только то (из трех) значение Z_{123}, которое соответствует частоте собственных колебаний перекрытия x_{123} (примерно равной частоте α). На графике $\alpha\left(x_{123}\right)$ этому значению Z_{123} соответствует только та кривая x_{123}, которая на данной частоте α ближе других распложена к прямой $x_{123} = \alpha$ (рис. 2);

– на частотах $f \geq 1,4 f_2 \sqrt{1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}}$ вместо формулы (7) используют более простую формулу

$$\Delta L_2 = 20\lg\left|-\frac{f^4}{f_1^2 f_2^2} + \frac{f^2}{f_1^2}\left(1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2}\frac{f_1^2}{f_2^2}\right) - 1\right|. \tag{9}$$

Чтобы приближенно построить график этого уравнения, из точки $f_0 = f_2\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)\frac{f_1^2}{f_2^2}}$ на оси абсцисс графика ΔL проводят прямую с наклоном 40 дБ на октаву (рис. 3);

– определяют величину ΔL_3 снижения приведенного уровня ударного шума на средних и высоких частотах по формуле

$$\Delta L_2 = 20\lg\frac{f^2}{f_1^2 f_2^2} + 10\lg\frac{P_1 P_2}{P_{c1} P_{c2}} - 6. \tag{10}$$

Построение графика уравнения ΔL_3 выполняют следующим образом. Из точки $f_{01} = \sqrt{f_1 f_2}$ на оси абсцисс откладывают ординату, равную $10\lg\frac{P_1 P_2}{P_{c1} P_{c2}} - 6$ дБ (точка А, рис. 3). Из точки А проводят прямую с наклоном 12 дБ на октаву. Пересечение прямой с графиками ΔL_1 и ΔL_2 (точка В) определит область средних и высоких частот. В этой области частот построение графика выполняют по значениям ΔL_3, рассчитанных с учетом частотной зависимости приведенного коэффициента жесткости прокладочных материалов.

– на график ΔL наносят установленную кривую требуемого снижения приведенного уровня ударного шума $\Delta L_т$;

– вычисляют индекс приведенного уровня ударного шума L_{nw} проектируемого междуэтажного перекрытия, учитывая, что вместо нормативной кривой используют кривую $\Delta L_т$.

Разработанный инженерный метод расчета позволяет с точностью до 2 дБ определять величину снижения приведенного уровня ударного шума многослойными междуэтажными перекрытиями. Сравнение расчетных и измеренных частотных характеристик снижения приведенного уровня ударного шума показала хорошее соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований [9,14,15].

В результате анализа звукоизолирующих свойств различных междуэтажных перекрытий установлено, что при одинаковой поверхностной плотности изоляция ударного шума многослойными конструкциями больше, чем традиционными с полами по упругим прокладкам. При равной изоляции ударного шума поверхностная плотность многослойных междуэтажных перекрытий меньше, чем у перекрытий с полами по упругим прокладкам. Поэтому многослойные междуэтажные перекрытия можно рекомендовать для применения во всех видах гражданских зданий массового строительства.

Выводы

1. Разработанный инженерный метод расчета изоляции ударного шума многослойными междуэтажными перекрытиями учитывает изменение звукоизоляции от цилиндрической жесткости, поверхностной плотности инерционных элементов и жесткости звукоизоляционных прокладочных материалов, что позволяет рационально конструировать перекрытия.

2. Получены формулы для определения границ частот собственных колебаний перекрытий, в пределах которых вычисляют величину снижения приведенного уровня ударного шума. Разработана последовательность построения зависимости частот собственных колебаний системы и снижения уровня ударного шума новыми конструкциями многослойных междуэтажных перекрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин В.А., Клименко В.В., Пороженко М.А. Исследование звукоизоляции многослойных междуэтажных перекрытий // Строительство и реконструкция. 2018. №3 (77). С. 46-49.

2. Герасимов А.И., Коваленко К.Н. Оценка изоляции воздушного шума междуэтажными перекрытиями с регулируемыми полами в гражданских зданиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 70-72.

3. Герасимов А.И., Никонова Е.В. Влияние частотных характеристик динамической жесткости рулонных материалов на улучшение изоляции ударного шума // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №4. С. 59-61.

4. Кочкин А.А., Шашкова Л.Э. О повышении звукоизоляции ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 198-199.

5. 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.

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

7. Старцева О.В., Овсянников С.Н. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. №2 (39). С. 176-184.

8. Пороженко М.А. Изоляция ударного шума ограждающими конструкциями здания // Бюллетень строительной техники. 2018. №6. С. 34-35.

9. Бобылев В.Н., Тишков В.А., Гребнев П.А., Монич Д.В. Инженерный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом двойственной природы прохождения звука // Academia. Архитектура и строительство. 2016. №1. С. 134-138.

10. Бобылев В.Н., Тишков В.А., Гребнев П.А., Щеголев Д.Л., Монич Д.В. Прохождение звука через однослойные и многослойные конструкции зданий // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. №5. С. 175.

11. Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental studu of sound insulation in multilayer enclosing structures // Noise Control Engineering Journal. 2014. № 62 (5). P. 354-355.

12. Горин В.А., Клименко В.В. Снижение уровня ударного шума паркетными полами // Жилищное строительство. 2013. №6. С. 22-24.

13. Кочкин А.А. О влиянии вибропоглощающей прослойки на звукоизоляцию слоистых ограждений // В сборнике: Защита населения от повышенного шумового воздействия. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. 2015. С. 265-269.

14. Горин В.А., Клименко В.В., Филиппенко А.А. Звукоизоляция слоистых междуэтажных перекрытий гражданских зданий. В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт // Материалы 2-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного университета. 2015. С. 41-45.

15. Горин В.А., Клименко В.В., Литовкин К.Ю. Изменение физико-механический свойств звукоизоляционных прокладочных материалов в процессе эксплуатации. В сборнике: Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. 2017. С. 153-157.

REFERENCES

1. Gorin V. A., Klimenko V. V., Porozhenko M. A. Issledovaniye zvukoizolyatsii mnogosloynykh mezhduetazh-nykh perekrytiy [Investigation of sound insulation of multilayer floors]. *Building and reconstruction*. 2018. No 3 (77). Pp. 46-49.

2. Gerasimov A. I., Kovalenko K. N. Otsenka izolyatsii vozdushnogo shuma mezhduetazhnymi perekrytiyami s reguliruyemymi polami v grazhdanskikh zdaniyakh [Evaluation of air noise insulation between floors with adjustable floors in civil buildings]. *Industrial and civil engineering*. 2014. No. 11. Pp. 70-72.

3. Gerasimov A. I., Nikonova E. V. Vliyaniye chastotnykh kharakteristik dinamicheskoy zhestkosti rulonnykh materialov na uluchsheniye izolyatsii udarnogo shuma [Influence of frequency characteristics of dynamic rigidity of roll materials on improvement of shock noise isolation]. *Industrial and civil engineering*. 2016. No. 4. Pp. 59-61.

4. Kochkin A. A., Shashkova L. E. O povyshenii zvukoizolyatsii ograzhdayushchikh konstruktsiy [On increasing sound insulation of enclosing structures]. *Academia. Architecture and construction*. 2010. No. 3. Pp. 198-199.

5. Kochkin A. A., Shubin I. L., Kochkin N. A. O prokhozhdenii i izluchenii zvuka v sloistykh vibrodempfiro-vannykh elementakh [On the passage and radiation of sound in layered vibro-damped elements]. *Building and reconstruction*. 2016. No 3 (65). Pp. 119-125.

6. Lepuga O. V., Ovsyannikov S. N. Issledovaniye zvukoizoliruyushchey sposobnosti oblegchennykh peregorodok [The study of the sound-insulating ability of lightweight partitions]. *Bulletin of Tomsk state University of architecture and construction*. 2014. No 5 (46). Pp. 98-105.

7. Startseva O. V., Ovsyannikov S. N. Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya zvukoizolyatsii pere-gorodok [Theoretical and experimental studies of sound insulation of partitions]. *Bulletin of Tomsk state University of architecture and construction.* 2013. No 2 (39). Pp. 176-184.

8. Porozhenko, M. A. Izolyatsiya udarnogo shuma ograzhdayushchimi konstruktsiyami zdaniya [Impact noise Insulation of the enclosing structures of the building]. *Bulletin of construction equipment*. 2018. No. 6. Pp. 34-35.

9. Bobylev V. N., Tishkov V. A., Grebnev P. A., Monich D. V. Inzhenernyy metod rascheta zvukoizolyatsii sendvich-paneley s uchetom dvoystvennoy prirody prokhozhdeniya zvuka [Engineering method of calculation of sound insulation of sandwich panels taking into account the dual nature of sound transmission]. *Academia. Architecture and construction*. 2016. No. 1. Pp. 134-138.

10. Bobylev V. N., Tishkov V. A., Grebnev P. A., Shchegolev D. L., Monich D. V. Prokhozhdeniye zvuka cherez odno-sloynyye i mnogosloynyye konstruktsii zdaniy [The Passage of sound through single-layer and multi-layer structures of buildings]. *Scientific notes of the faculty of physics of Moscow University*. 2017. No. 5. Pp. 175.

11. Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental studu of sound insulation in multilayer enclosing structures. *Noise Control Engineering Journal*. 2014. No 62 (5). Pp. 354-355.

12. Gorin V. A., Klimenko V. V. Snizheniye urovnya udarnogo shuma parketnymi polami [Reduction of impact noise level by parquet floors]. *Housing construction*. 2013. No. 6. Pp. 22-24.

13. Kochkin A. A. O vliyanii vibropogloshchayushchey prosloyki na zvukoizolyatsiyu sloistykh ograzhdeniy [On the influence of vibration-absorbing layer on sound insulation of layered fences. In the collection: Protection of the population from increased noise exposure]. Collection of reports of the all-Russian scientific and practical conference with international participation. Ed.So. Ivanov, K. B. Friedman. 2015. Pp. 265-269.

14. Gorin V. A., Klimenko V. V., Filippenko A. A. Zvukoizolyatsiya sloistykh mezhduetazhnykh perekrytiy grazhdanskikh zdaniy. V sbornike: Ustoychivoye razvitiye regiona: arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Sound Insulation of layered floors of civil buildings. In the collection: Sustainable development of the region: architecture, construction, transport]. Proceedings of the 2nd international scientific-practical conference of the Institute of architecture, construction and transport of Tambov state University. 2015. Pp. 41-45.

15. Gorin V. A., Klimenko V. V., Litovkin K. Y. Izmeneniye fiziko-mekhanicheskiy svoystv zvukoizolyatsion-nykh prokladochnykh materialov v protsesse ekspluatatsii [Change of physical and mechanical properties of sound-proof cushioning materials during operation. In the collection: Sustainable development of the region: Architecture, construction, transport]. Proceedings of the 4th International scientific-practical conference of the Institute of architecture, construction and transport of Tambov state technical University. 2017. Pp. 153-157.

Информация об авторах:

Горин Виктор Александрович
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия,
Кандидат технических наук, профессор кафедры АГиПЗиС
E-mail: 2486550@mail.ru

Клименко Виталий Владимирович
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия,
Кандидат технических наук, доцент кафедры АГиПЗиС
E-mail: 4552439@mail.ru

Пороженко Марианна Александровна
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физика Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,
Главный научный сотрудник
E-mail: mporoz@mail.ru

Information about authors:

Gorin V.A.
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia,
Candidate of Technical Sciences, professor of the department
E-mail: 2486550@mail.ru

Klimenko V.V.
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
E-mail: 4552439@mail.ru

Porozhenko M.A.
Research Institute of building physics of the Russian Academy of architecture and building Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russia,
Chief Researcher
E-mail: mporoz@mail.ru