

УДК 691.33

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

ОЦЕНКА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.С. Федюк, А.В. Баранов, Р.А. Тимохин
Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка эффективных конструкционных материалов с улучшенными акустическими характеристиками актуальна для современной строительной индустрии. Учитывая многообразие международных строительных норм по звукоизоляции и звукозащите зданий, необходима систематизация современных методов изучения этих характеристик. Целью исследования был всесторонний обзор методов определения акустических характеристик в строительстве, а также анализ литературы и международных норм для повышения здоровья и комфорта городского населения.

Материалы и методы. В связи с многообразием и сложностью исследования акустических характеристик зданий, помещений и отдельных ограждающих конструкций в статье приведен анализ методов оценки данных характеристик. Выявлены ограничения на размеры помещений и звуковых частот для измерения времени реверберации. Показан процесс усовершенствования метода измерения акустического импеданса в трубе Кундта. Детально рассмотрена методология определения числовых параметров звукоизоляции в зданиях в результате исследования ограждающих конструкций с учетом спектров различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Выявлено, что существующие методы измерения ударного шума показывают плохую воспроизводимость в низкочастотном диапазоне. Анализ работ доказал, что характеристики отражения звука теоретически зависят от толщины и жесткости отражающей поверхности и ее поверхностной плотности.

Заключение. Область применения строительных материалов с улучшенными акустическими характеристиками достаточно обширна. Дальнейшие исследования могут быть направлены на усовершенствование методов исследования характеристик звукопоглощения и звукоотражения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительные материалы, конструкции, звукопоглощение, бетон, звукоизоляция, шум, звук, измерение.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем благодарность д-ру техн. наук, проф. В.С. Лесовику за научное консультирование, а также благодарны за уделенное внимание анонимным рецензентам этой статьи.

Поступила 09.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Федюк Р.С., Баранов А.В., Тимохин Р.А. Оценка звукопоглощающих характеристик и параметров звукоизоляции строительных изделий. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (2): 274-285. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

© Федюк Р.С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

CRITICAL REVIEW OF METHODS FOR EVALUATING ACOUSTIC CHARACTERISTICS OR PREMISES

*Roman S. Fediuk, Andrey V. Baranov, Roman A. Timokhin
the Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russia*

ABSTRACT

Introduction: *The development of effective structural materials with improved acoustic characteristics is relevant for the modern construction industry. Considering the variety of international building standards for acoustic insulation and soundproofing of buildings, it is essential to systematize the modern methods of studying these characteristics. The purpose of the study was a comprehensive review of methods for determining acoustic characteristics in construction, as well as an analysis of literature and international standards to improve the health and comfort of the urban population.*

Main part: *Due to the variety and complication of the study of the acoustic characteristics of buildings, premises and individual walling, the article provides an analysis of methods for evaluating these characteristics. The limitations on the size of rooms and sound frequencies for measuring reverberation time have been identified. The process of improving the method of measuring acoustic impedance in Kundt's tube is shown. The methodology for determining the numerical parameters of sound insulation in buildings using the study of building envelopes taking into account the spectra of various noise sources located inside and outside the building is considered in detail. It was found that existing methods for measuring impact noise show poor reproducibility in the low frequency range. The analysis of the works proved that the sound reflection characteristics theoretically depend on the thickness and rigidity of the reflecting surface and its surface density.*

Conclusions: *The scope of building materials with improved acoustic characteristics is quite extensive. Further research may be aimed at improving methods for studying the characteristics of sound absorption and sound reflection.*

KEYWORDS: *building materials, structures, sound absorption, concrete, sound insulation, noise, sound, measurement.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *We express our gratitude to Dr. of Tech. Sci., Professor V.S. Lesovik for scientific advising, and are grateful for the anonymous reviewers' attention paid to this article.*

Submitted 09.04.2020, revised 24.04.2020.

The author have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Fediuk R.S. Baranov A.V., Timokhin R.A. Critical review of methods for evaluating acoustic characteristics of premises. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 274-285. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

© Fediuk R.S.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительная урбанизация, насыщение городов различными транспортными средствами и объектами промышленности повлекло за собой рост уровня шума [1]. Соответственно, акустический комфорт признан врачами важным компонентом городского комфорта и стал представлять собой актуальную задачу как для жилищного строительства, так и для генерального планирования городов. Поэтому защита от окружающего шума является предметом научных исследований ученых различных специальностей, ведь в современном обществе качество и уровень жизни приобретают из года в год все более важное значение [2].

Однако помимо слышимого звука большое влияние на человека оказывают инфразвук и ультразвук. В частности, инфразвук возникает от действия ветряных электростанций, вибрации железнодорожных мостов, градирен, а также может ощущаться внутри автомобилей [3, 4, 5]. Ультразвуковое и инфразвуковое акустическое нелетальное оружие в последнее время все чаще и чаще ставится на вооружение в правоохранительные органы различных государств.

Необходимо отделение человека от источников шума с помощью строительных ограждающих конструкций. Оценка акустических характеристик этих конструкций представляет собой достаточно сложную задачу. Нужен учет как отражения звуковых волн, так и их поглощения, тем более что в зависимости от частоты этих волн данные характеристики значительно меняются. Разработан ряд методов для исследования акустических характеристик в строительстве, которые достаточно сложны для понимания; эти методы нуждаются в систематизации.

Исходя из вышеизложенного звукоизоляция конструкций и их акустические характеристики стали особо значимы в последние десятилетия вследствие тенденции размещения городского населения в многоквартирных домах. Использование жильцами телевизоров, музыкальных центров, домашних кинотеатров, а также ручного строительного электроинструмента повышает требования к строительству с учетом акустических характеристик ограждающих конструкций. Кроме того, строительная промышленность по всему миру стала применять различные звукопоглощающие материалы, которые способны снизить уровень звукового давления как в открытых, так и в закрытых помещениях, а также увели-

чить звукоизолирующие характеристики. Известно [6], что звукопоглощающие характеристики материала по большей части являются функцией его плотности: более легкие лучше поглощают звук. Цель статьи: всесторонний обзор методов определения акустических характеристик строительных изделий.

ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕВЕРБАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

Есть несколько причин для измерения времени реверберации. Во-первых, уровень звукового давления источников шума, разборчивость речи и условия конфиденциальности в комнате сильно зависят от времени реверберации. В качестве исследуемых помещений принимаются жилые комнаты, лестницы и пролеты, производственные цеха, классные комнаты, офисы, рестораны, выставочные центры, спортивные залы, вокзалы и аэропорты. Во-вторых, время реверберации измеряется для того, чтобы определить в помещении поправки на звукопоглощение, необходимые для различных типов других акустических измерений, таких как измерение звукоизоляции в соответствии с ISO 140 и звуковой мощности источников шума в соответствии с ISO 3740 [7]. Реверберационная камера используется для измерения звукопоглощающих характеристик ограждающих конструкций (рисунок 1). Среднее время реверберации определяется в реверберационной камере с исследуемым образцом и без него. По результатам измерений времени реверберации эквивалентная площадь звукопоглощения образца A_T рассчитывается по формуле Сэбина [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Если образец равномерно распределен по поверхности камеры (например плоский звукопоглотитель или несколько объектов), коэффициент звукопоглощения определяется как отношение эквивалентной площади звукопоглощения образца A_T к его площади S . Согласно ASTM C 423-17 [13] и ISO 354: 2003 [14] и ГОСТ 31704–2011, измерения проводятся для третьоктавных полос со следующими средними геометрическими частотами, Гц: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000. Объем камеры реверберации составляет 150–500 м³. Для обеспечения удовлетворительной степени диффузии звукового поля независимо от формы камеры используются стационарные или подвесные диффузоры, или вращающиеся лопасти. Площадь образца для испытаний должна составлять от 10 до 12 м².



Рисунок 1 – Измерительная система реверберационной комнаты [17]

Figure 1 – System of testing measurement in reverberation room [17]

Однако, например, в статье [15] площадь образца была уменьшена до $1,87 \text{ м}^2$, в то время как результаты могут быть адекватными, учитывая, что помещение обеспечивает довольно рассеянное звуковое поле. Время реверберации T , с, необходимое для того, чтобы средняя пространственная плотность звуковой энергии падала в ограниченном объеме на 60 дБ от исходного уровня после выключения источника излучения, измеряется в соответствии с ISO 3382-2: 2008 [16] и ISO 354: 2003 [17].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ИМПЕДАНСА В ИМПЕДАНСНОЙ ТРУБЕ

Метод испытания в соответствии с ISO 10534-2: 1998 [18] и ASTM C 384-04 [19] включает использование импедансной трубы (трубы Кундта), двух разно расположенных микрофонов и цифровой системы частотного анализа для определения звукопоглощения строительных материалов (рисунок 2). Он также может быть использован для определения акустического сопротивления поверхности. Акустический импеданс – это сложное звуковое сопротивление среды, которое представляет собой отношение комплексных амплитуд звукового давления к вибрационной объемной скорости (комплексной скорости звуковых частиц) на определенной частоте в плоскости отсчета. Поскольку значения импеданса звукопоглощающего материала связаны с его физическими свойствами, такими как со-

противление воздушного потока, пористость, упругость и плотность, измерения, описанные в этом методе испытаний, полезны для фундаментальных исследований и разработок звукопоглощающих материалов. Метод был впервые применен Ивасе [20] с использованием трех микрофонов (два перед образцом и третий – за ним). Края образцов они закрывали тефлоновой лентой, смазанной тонким слоем вазелина. Фенг [21] модифицировал данный метод, эта модификация и легла в основу стандарта ISO 10534 [19]. В стандартной конфигурации импедансная труба опирается на жесткую пластину, что исключает вибрации, а в модифицированной трубке с концом, вставленным в безэховое помещение, звуковая энергия передается только через образец и характеризуется коэффициентом передачи. Таким образом, с помощью процедуры Фенга можно разделить реальный коэффициент поглощения и коэффициент передачи. Диапазон частот для определения коэффициента звукопоглощения при использовании импедансной трубы составляет 250–5000 Гц, он ограничен в высокочастотной части из-за фиксированного диаметра импедансной трубы и неопределенностью, связанной с получением небольших разностей фаз на низких частотах. В ходе анализа литературы выявлена неприменимость полученных коэффициентов звукопоглощения из-за ошибки, вызванной фазой и величиной частотной характеристики, увеличивающейся, когда частота стремится к нулю.

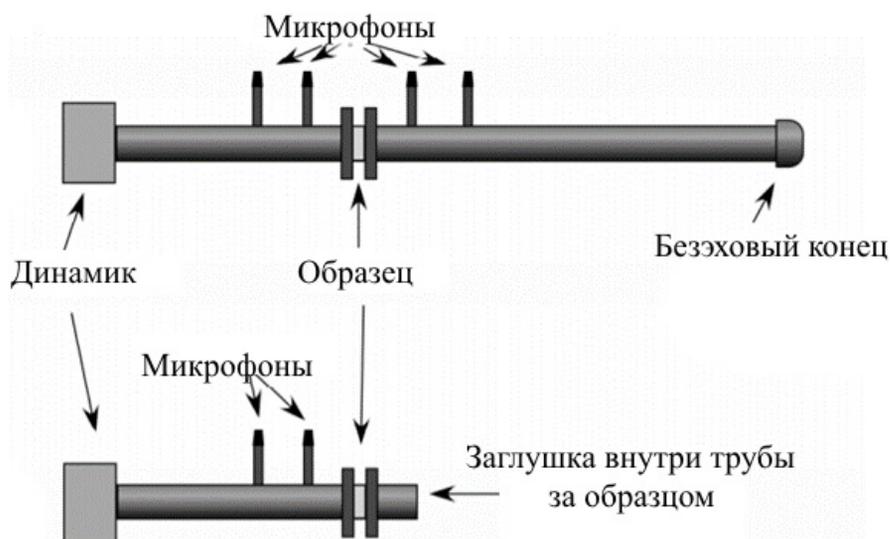


Рисунок 2 – Импедансная труба [22]

Figure 2 – Impedance tube [22]

ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ

Метод ISO 717-1 [23] определяет числовые параметры звукоизоляции в зданиях с помощью исследования строительных конструкций, таких как стены, полы, двери и окна, а также учитывает спектры различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Коэффициент звукоизоляции от воздушного шума R_w считается фундаментальным параметром для лабораторных испытаний ограждающих конструкций. Этот коэффициент учитывает диапазон частот в третьоктавных полосах, от 100 Гц до 3150 Гц, что может быть недостаточно для удовлетворительного описания поведения на низких и высоких частотах. Чтобы рассмотреть акустические характеристики, расширенные по частотам относительно нормализованных шумовых спектров, были введены термины адаптация спектра S и C_{tr} (розовый шум и дорожный шум соответственно). В проекте стандарта ISO / DIS 16717-1 [24] использовались три коэффициента: R_{living} , R_{speech} и $R_{traffic}$, заменяющие «старую» концепцию коэффициента звукоизоляции от воздушного шума. Гризотто и Ди Белла [25], а также и Машович [24] сообщают, что это позволяет измерить в лаборатории скорость снижения звука ниже 100 Гц с использованием современных стандартов измерения. В частности, измерение звукоизоляции от воздушного шума на частотах 50–100 Гц представляет несколь-

ко проблем [25]. На низкой частоте проблемы возникают из-за собственных мод, в том числе в довольно больших лабораторных помещениях. Во многих случаях диффузное звуковое поле не может быть обеспечено на низких частотах, и методы измерения стандартов ISO 10140 [23] могут использоваться только для «дополнительной информации». Стандарт ISO 10140 дает завышенную оценку R на частотах ниже 100 Гц по сравнению со значениями, полученными из измерений интенсивности звука. Однако использование метода интенсивности возможно, но это не просто. ISO / DIS 16717-1 [24] рассматривают диапазон только 50–5000 Гц для одночисловых значений. Возможным решением всех этих проблем было бы рассмотрение новых показателей от 100 Гц до 5000 Гц с возможностью расширения до 50 Гц. Стандартные процедуры для натуральных измерений звукоизоляции между комнатами в настоящее время описаны в международных стандартах ISO 140. Однако они предназначены для использования в помещениях со звуковыми полями, приближающимися к диффузным полям (таблица).

На практике во многих квартирах имеются комнаты объемом менее 25 м³, где отсутствие рассеянного звукового поля на низких частотах в сочетании с выбором звукового давления в центральной зоне комнаты делает измерения менее надежными и менее актуальными для жителей здания.

Таблица
Краткая характеристика типичных шумов, слышимых в жилых помещениях

Table
A brief description of typical noises heard in premises

Вид шума	Ссылка на источник литературы
Модификатор	Концентрация, в % от массы серы
Шум в жилых зонах	[26,27]
Шум соседей	[22,26,28]
Воздушный шум от соседей (телевидение, музыка и разговоры)	[22,32,34,28]
Шум от падающих / движущихся предметов соседей	[22,32,33,26]
Уличный и транспортный шум	[26,29]
Работа электроприборов соседей	[26,30]
Ходьба соседей	[22,32,33,34,26,35]
Вибрация сотовых телефонов соседей	[26,31]

Учитывая, что звукоизоляция в низкочастотном диапазоне (особенно ниже 100 Гц) важна во всех зданиях, особенно в каркасных деревянных зданиях, исследования Хопкинса и Тернера [36] дали толчок для выявления новых процедурных изменений для повышения надежности и актуальности измерения звукоизоляции в полевых условиях. Эти процедурные изменения были впоследствии использованы в предложении о пересмотре четырех Международных стандартов звукоизоляции (ISO 140, части 4, 5, 7 и 14) на пленарной сессии ISO TC43 SC2 [37] в Корее (ноябрь 2009 г.). Предложение было принято, и Карл Хопкинс стал организатором рабочей команды для написания новых стандартов. Первый международный стандарт ISO / DIS 16283-1 [38] был написан для натурных измерений воздушной звукоизоляции и был распространен среди всех стран в качестве проекта для сбора комментариев весной 2012 г. В результате ISO 140-4: 1998 [39] был заменен ISO 16283-1: 2014 [38], который вводит новые подходы к направленности источника, предел в 8 дБ между соседними 1/3 октавными полосами в комнате источника, средство для расчета «разностей уровней» и низкочастотная процедура измерения уровня звукового давления, не включенная в ISO 140-4. Для процедуры по умолчанию в ISO 16283-1 вводится возможность использовать метод «ручного сканирования микрофоном», также не включенный в ISO 140-4 [6]. ISO 16283-3 устанавливает методы определения звукоизоляции в воздухе с помощью элементов фасада и всего фасада с использованием измерений уровня звукового давления. Эти методы предназначены для объема помещений в диапазоне от 10 м³ до 250 м³ в

диапазоне частот со среднегеометрическими частотами третьоктавной полосы от 50 Гц до 5000 Гц. Сравнение результатов измерений с точки зрения уровня ударного шума и звукоизоляции в соответствии с ISO 140 и ISO 15186 [40] показывает их несоответствие, особенно на низких частотах. Это можно объяснить тем фактом, что на низких частотах, где могут возникать комнатные резонансы, точное определение времени реверберации затруднено.

УДАРНЫЙ ШУМ

При нормировании ударного шума согласно DIN 52210 и ASTM E1007-19 [41] исследуются только частоты от 100 до 3150 Гц. На тестируемом перекрытии устанавливается прибор «tapping machine», оснащенный пятью одинаковыми ударниками весом по 500 г каждый (рисунок 3). С помощью вала эти ударники поднимаются и в определенном ритме свободно падают один за другим на перекрытие. В тестируемой комнате под перекрытием измеряют уровень шума. Чжан и Пун в ходе исследования [14] модифицировали ASTM E1007-19 [41], в частности, они использовали металлический шар для создания ударного шума вместо прибора «tapping machine». Цель теста состояла в том, чтобы определить эффекты снижения шума каждой пластины по сравнению с результатами фонового эксперимента. В данном исследовании уровень шума, вызванного воздействием образцов металлическим шариком, определялся в диапазоне частот также от 100 Гц до 3150 Гц. Данные об уровне шума записывались с интервалами 0,2 с, а общая длительность измерения составляла 3 с, чтобы установить максимальный уровень шума.

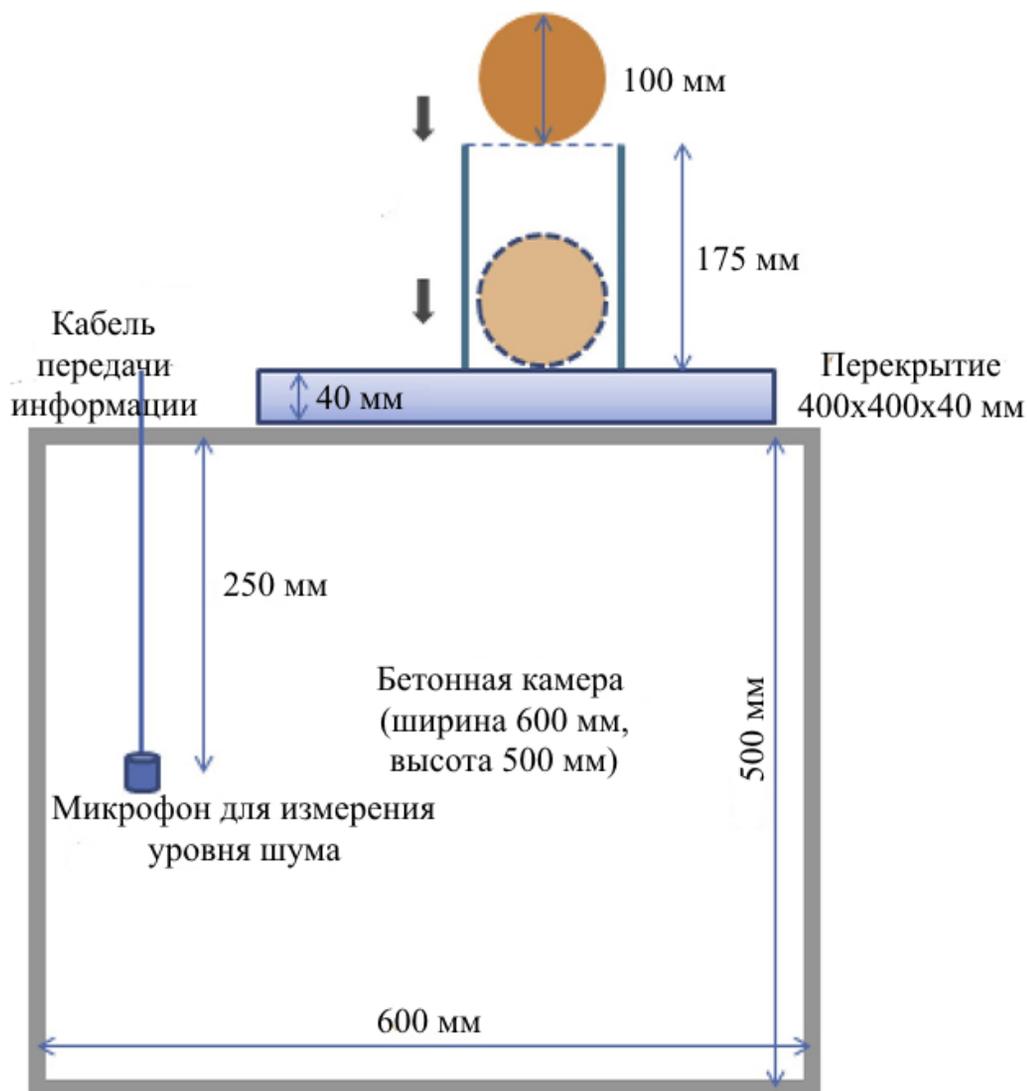


Рисунок 3 – Схема установки для испытания звукоизоляции [42]

Figure 3 – Diagram of sound insulation test setup [42]

Каждый тест повторяли 3 раза, чтобы получить средний уровень шума. Низкочастотная воздушная и ударная изоляция особенно важна в легких зданиях из-за низкого уровня звукоизоляции в низкочастотном диапазоне. Однако существующие методы измерения ударного шума показывают плохую воспроизводимость в низкочастотном диапазоне.

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ (ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА)

Пористый бетон обладает способностью поглощать звук, но имеет низкую звукоизоляцию. Для решения этой проблемы штукатурка или окраска пористого бетона может повлиять на уменьшение звукопоглощения и повыше-

ние его звукоизоляционных свойств [43]. Коэффициент звукопоглощения для тяжелого бетона составляет около 0,02, это означает, что около 98% звуковой энергии отражается. Чем плотнее (тяжелее) бетон, тем выше его звукоизолирующие характеристики [44]. Диапазон отражаемых частот, а также степень сопротивления звукоизоляции в основном зависят от реальной жесткости бетонной массы. Что касается концепции отражения звука от твердой стены, было сформулировано, что частота отражения звука теоретически зависит от толщины и жесткости стены и ее поверхностной плотности [45]. Плотный бетон имеет в 10 раз худшее звукопоглощение по сравнению с ячеистым бетоном [46, 47].

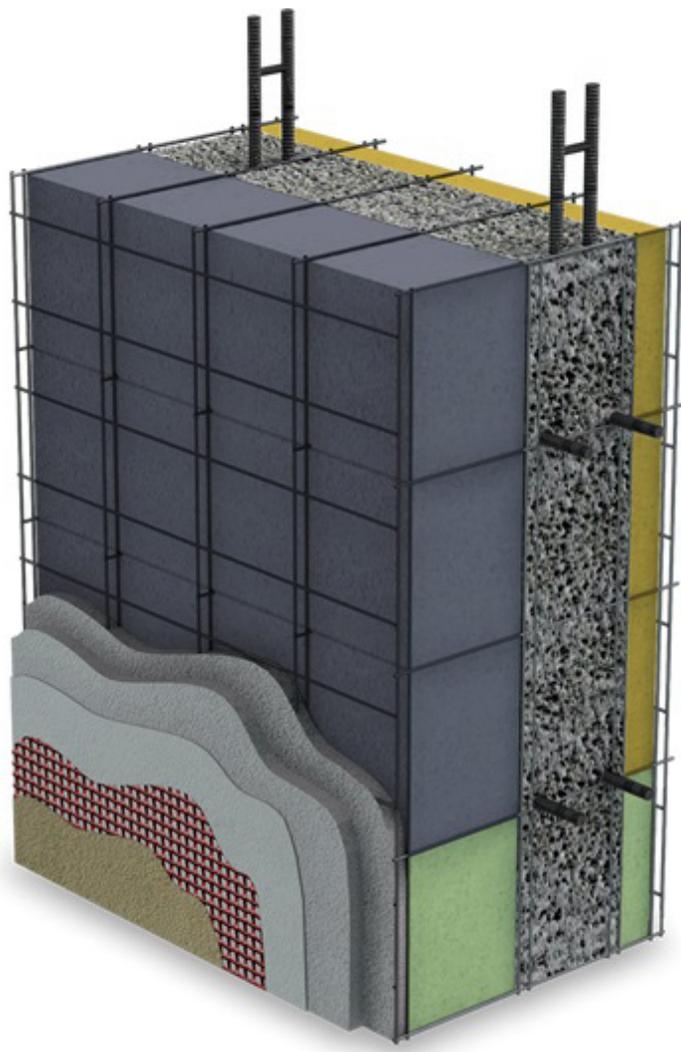


Рисунок 4 – Модель стены из железобетона с чрезвычайно высокой звукоизоляцией

Figure 4 – Model for the construction of RC walls with extremely high acoustic insulation

На акустические характеристики ячеистого бетона может повлиять наличие пузырьков газа, их размер, распределение и протяженность пор и их консистенция [15,48, 49]. На рисунке 4 показана модель стены из железобетона с чрезвычайно высокой звукоизоляцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защита от окружающего шума является предметом научных исследований ученых различных специальностей, ведь в современном обществе качество и уровень жизни приобретают из года в год все более важное значение. В связи с многообразием и сложностью исследования акустических характеристик зданий, помещений и отдельных ограждаю-

щих конструкций в статье приведен анализ методов оценки данных характеристик. Выявлены ограничения на размеры помещений и звуковых частот для измерения времени реверберации. Однако на низких частотах (ниже 100 Гц) точные результаты измерений не могут быть получены из-за низкочастотных колебаний реверберационной камеры. Показан процесс усовершенствования метода измерения акустического импеданса в трубе Кундта. Диапазон частот для определения коэффициента звукопоглощения при использовании импедансной трубы составляет 250–5000 Гц, он ограничен в высокочастотной части из-за фиксированного диаметра импедансной трубы и неопределенностью, связанной с получением

небольших разностей фаз на низких частотах. Детально рассмотрена методология определения числовых параметров звукоизоляции в зданиях с помощью исследования ограждающих конструкций с учетом спектров различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Однако и при исследовании звукоизоляции на низких частотах появляются проблемы из-за возникновения собственных мод, в том числе в довольно больших лабораторных помещениях. Изучены существующие методы измерения ударного шума при помощи прибора «tapping machine» или же падающего металлического шара. Анализ работ доказал, что характеристики отражения звука теоретически зависят от толщины и жесткости отражающей поверхности и ее поверхностной плотности.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на устранение недостатков современных нормативов, которые часто не соответствуют друг другу. Что касается отечественных норм исследования акустических характеристик, то они являются зачастую переводными версиями зарубежных нормативов. Очевидно требуется углубление исследований применимости методов измерений акустических характеристик зданий и их конструкций, особенно для низких и инфразвуковых частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Cuthbertson D., Berardi U., Briens C., Berruti F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. *Biomass and Bioenergy*. 2019. doi:10.1016/j.biombioe.2018.11.007.
- Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов: монография. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Омск, 2011. 420 с.
- Vinokur R. Infrasound sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, *Appl. Acoust.* (2004). doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8.
- Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. Sound Vib.* 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030.
- Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, *J. Sound Vib.* 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5.
- Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Build. Environ.* (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061.
- Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: *Int. Congr. Noise Control Eng.* 2005. INTERNOISE 2005.
- Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Сумской Д.А. Теплоизоляционные растворы пониженной плотности // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Том 1. №1. С. 40 – 50.
- Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, *Appl. Acoust.* 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
- Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, *Constr. Build. Mater.* 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161.
- Maa D.Y. Microperforated-panel wideband absorbers, *Noise Control Eng. J.* 1987. doi:10.3397/1.2827694.
- Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, *Build. Environ.* 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005.
- ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, *ASTM Int.* 2007. doi:10.1520/C0423-17.2.
- Елистраткин М.Ю., Кожухова М.И. Анализ факторов повышения прочности неавтоклавного газобетона // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Том 1. №1. С. 59 – 68.
- Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 125. 2016. 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019.
- Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: *Acoust. Sci. Technol.*, 2005. doi:10.1250/ast.26.170.
- Milford I., Høvsøien C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.
- International Organization for Standardization, ISO 10534-2, *Work.* 2001.
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, ASTM Philadelphia. (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2.
- Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. *J. Acoust. Soc. Japan.* 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411.
- Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, *Appl. Acoust.* 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013.
- Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates, *Constr. Build. Mater.* 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228.

23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, Standards. 2013.
24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. doi:10.1121/1.4824629.
25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: *Proc. Forum Acust.* 2014.
26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.*, 2015.
27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011.
28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: *Internoise 2001*, 2001.
29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: *Energy Procedia.* 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246.
30. Høvsøien C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future*, 2016.
31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, *Compos. Struct.* 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079.
32. Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бураков Н.М., Брагина Л.Л. Исследование влияния плазмохимического модифицирования на макро- и микроструктуру поверхностного слоя автоклавных стеновых материалов // *Строительные материалы и изделия.* 2018. Том 1. №2. С. 4 – 10.
33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, *Build. Acoust.* 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105.
34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003.
35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, *J. Sound Vib.* 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8.
36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005.
37. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Гудов Д.В., Шураков И.М., Корбут Е.Е. Оптимизация рецептурно-технологических параметров изготовления ячеистобетонной смеси // *Строительные материалы и изделия.* 2018. Том 1. №2. С. 30 – 36.
38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smiderle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a Brazilian public school building, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.* 2015.
39. International Organization for Standardization, ISO 14044, 2006.
40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: *Proc. - Eur. Conf. Noise Control.* 2008. doi:10.1121/1.2933313.
41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: *14th Int. Congr. Sound Vib.* 2007, ICSV 2007, 2007.
42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044.
43. Елистраткин М.Ю., Минакова А.В., Джамиль А.Н., Куковицкий В.В., Эльян Исса Жамал Исса. Композиционные вяжущие для отделочных составов // *Строительные материалы и изделия.* 2018. Том 1. №2. С. 37 – 44.
44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.
45. Tada S. Material design of aerated concrete - An optimum performance design, *Mater. Struct.* 1986. doi:10.1007/BF02472306.
46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *ACI J. Proc.* 1954. doi:10.14359/11795.
47. Jones M.R., McCarthy M.J., McCarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective, *Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky.* 2003.
48. Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, 2009. doi:10.1002/9780470747339.
49. Arnaud L., Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

REFERENCES

1. Cuthbertson D., Berardi U., Briens C., Berruti F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. *Biomass and Bioenergy.* 2019. doi:10.1016/j.biombioe.2018.11.007.
2. Lesovik V.S., Chulkova I.L. *Upravlenie strukturoobrazovaniem stroitel'nyh kompozitov: monografiya* [Structural management of building composites: monograph]. Sibirskaja gosudarstvennaja avto-mobil'no-dorozhnaja akademija. Omsk, 2011: 420. (in Russian)
3. Vinokur R. Infrasonic sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, *Appl. Acoust.* (2004). doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8.
4. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. Sound Vib.* 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030.
5. Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, *J. Sound Vib.* 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5.

6. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Build. Environ.* (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061.
7. Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: *Int. Congr. Noise Control Eng.* 2005. INTERNOISE 2005.
8. Zagorodniuk L.Kh., Lesovik V.S., Sumskey D.A. Thermal insulation solutions of low density // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 1. S. 40 - 50.
9. Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, *Appl. Acoust.* 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
10. Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, *Constr. Build. Mater.* 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161.
11. Maa D.Y. Microperforated-panel wide-band absorbers, *Noise Control Eng. J.* 1987. doi:10.3397/1.2827694.
12. Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, *Build. Environ.* 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005.
13. ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, *ASTM Int.* 2007. doi:10.1520/C0423-17.2.
14. Elistratkin M.Yu., Kozhukhova M.I. Analysis of factors to increase the strength of non-autoclaved aerated concrete // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 1. S. 59 - 68.
15. Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 125. 2016. 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019.
16. Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: *Acoust. Sci. Technol.*, 2005. doi:10.1250/ast.26.170.
17. Milford I., Hørsøien C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.
18. International Organization for Standardization, *ISO 10534-2, Work.* 2001.
19. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method*, ASTM Philadelphia. (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2.
20. Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. *J. Acoust. Soc. Japan.* 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411.
21. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, *Appl. Acoust.* 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013.
22. Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates, *Constr. Build. Mater.* 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228.
23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, *Standards.* 2013.
24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. doi:10.1121/1.4824629.
25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: *Proc. Forum Acust.* 2014.
26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.*, 2015.
27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011.
28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: *Inter-noise 2001, 2001.*
29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: *Energy Procedia.* 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246.
30. Hørsøien C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 – 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.
31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, *Compos. Struct.* 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079.
32. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Burlakov N.M., Bragina L.L. Investigation of the effect of plasma-chemical modification on the macro- and micro-structure of the surface layer of autoclaved wall materials // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 2. S. 4 - 10
33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, *Build. Acoust.* 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105.
34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003.
35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, *J. Sound Vib.* 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8.
36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-dif-

fuse sound fields at low frequencies, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005.

37. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of the prescription and technological parameters of manufacturing aerated concrete mix // *Building materials and products.* 2018. Volume 1. No. 2. S. 30 - 36.

38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smid-erle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a brazilian public school building, in: *INTER-NOISE 2015 – 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.* 2015.

39. International Organization for Standardization, *ISO 14044*, 2006.

40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: *Proc. - Eur. Conf. Noise Control.* 2008. doi:10.1121/1.2933313.

41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: *14th Int. Congr. Sound Vib. 2007, ICSV 2007*, 2007.

42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044.

43. Elistratkin M.Yu., Minakova A.V., Jamil A.N., Kukovitsky V.V., Eljan Issa Zhamal Issa. Composite binders for finishing compounds // *Building materials and products.* 2018. Volume 1. No. 2. S. 37 - 44.

44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.

45. Tada S. Material design of aerated concrete-An optimum performance design, *Mater. Struct.* 1986. doi:10.1007/BF02472306.

46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *ACI J. Proc.* 1954. doi:10.14359/11795.

47. Jones M.R., Mccarthy M.J., Mccarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward : A UK perspective, *Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky.* 2003.

48. Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, 2009. doi:10.1002/9780470747339.

49. Arnaud L., Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все соавторы внесли равный вклад.

AUTHORS' CONTRIBUTION

The authors have equal contribution to the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федюк Роман Сергеевич – доц. кафедры гидро-техники, теории зданий и сооружений ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Баранов Андрей Вячеславович (Владивосток, Россия) – соискатель ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Тимохин Роман Андреевич (Владивосток, Россия) – студент ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman S. Fediuk – Associate Professor of the Hydraulic Engineering, Theory of Buildings and Structures Department, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Andrey V. Baranov (Vladivostok, Russian Federation), Aspirant, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Roman A. Timokhin (Vladivostok, Russian Federation), student, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).