Строительные материалы и изделия

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-13>
УДК 691

Р.С. Федюк, А.В. Баранов, Р.А. Тимохин, А.П. Свинцов

ФЕДЮК РОМАН СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., профессор Военного учебного центра
(автор, ответственный за переписку), SPIN: 6664-3813, ORCID: 0000-0002-2279-1240
fedyuk.rs@dvfu.ru

БАРАНОВ АНДРЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – соискатель, ORCID: 0000-0002-6024-4635,
de_montgomery@mail.ru

ТИМОХИН РОМАН АНДРЕЕВИЧ – студент Политехнического института (Школа)
romantimohin686@gmail.com

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

СВИНЦОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ – д.т.н., профессор, департамент «Строительство»,
ORCID: 0000-0002-7645-5103, svintsova@rambler.ru

Российский университет дружбы народов

Москва, Россия

Методы определения характеристик звукопоглощения строительных материалов и звукоизоляции конструкций (обзор)

Аннотация: Исследование акустических характеристик строительных материалов и конструкций необходимо для комфортной жизни людей в городских условиях. Несмотря на то что в нормативных документах развитых государств есть ряд методов их определения, единого понимания самих характеристик и путей их адекватного определения до сих пор нет. В настоящей работе мы попытались систематизировать и дать критический обзор нормативных документов, содержащих методы определения звукопоглощающих свойств материалов и звукоизоляционных характеристик конструкций. Впервые выявлены присущие разным методам закономерности определения характеристик звукопоглощения и звукоизоляции. Определены наиболее характерные показатели звукопоглощения. Произведено ранжирование по коэффициенту уменьшения шума NRC наиболее часто применяемых строительных материалов. Названы области применения рассматриваемых методик, проанализированы их преимущества и ограничения.

Ключевые слова: коэффициент уменьшения шума, звукопоглотитель, импедансная труба, реверберационная камера

Введение

Сегодня, когда уровень и качество жизни становятся приоритетными, шум рассматривается как серьезная опасность для здоровья [11, 25], поэтому особенно актуальны борьба с шумом и защита от инфразвука, возникающего вблизи ветряных электростанций, железнодорожных мостов, градилен, а также внутри автомобилей [28, 34, 35].

В строительной акустике рассматривают три процесса преобразования звуковой энергии: отражение звука, звукопоглощение и его передача через конструкцию.

Схематичная классификация материалов-звукопоглотителей по принципу действия представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схематическая классификация звукопоглотителей по принципу действия [1, 3, 8].

Анализируя рис. 1, видим, что резонансные поглотители служат для сокращения времени реверберации. Под реверберацией понимают наличие постепенно затухающего в закрытом помещении звука вследствие повторных отражений после прекращения звучания. Время реверберации в зависимости от вида помещений и частот составляет 0,2–2 с. Звукопоглощающие материалы и конструкции резонансного типа способны эффективно снижать время реверберации в помещениях различного назначения.

Подвесные поглотители более эффективны, чем закрепленные непосредственно на стенах. При закрепленных на ограждающих поверхностях поглотителях улучшается только звукоизоляция, однако не происходит значительного снижения уровня звука. Применение подвесных поглотителей исследовано довольно полно [17, 18, 27]. Однако остается нерешенной проблема того, что перфорированные и плитные поглотители рассчитаны для использования внутри помещений, что значительно сужает область их применения [28].

Эффективность пористых звукопоглотителей зависит от вида пористости (открытая или закрытая), диаметра и протяженности пор. Процесс звукопоглощения в пористых средах происходит в результате преобразования звуковой энергии в тепловую. Нормативные документы опираются на методики расчетов с использованием таких характеристик звукопоглощения среды, как волновое сопротивление и акустический импеданс. Волновое сопротивление – это произведение плотности среды на скорость звука, акустический импеданс – описание гармонических колебаний в комплексной форме (отношение комплексного давления к комплексной скорости) [2].

Цель применения отражателей звука противоположна звукопоглотителям: они с помощью своих геометрических характеристик обеспечивают акустику, например концертных залов.

Эффективность звукоизоляции в большей степени зависит от того, способно ли звуковое поле придать конструкции колебательные движения [1]. Процесс звукоизоляции зависит от количества слоев конструкции, поэтому поясним: в рамках данного обзора акцент сделан на акустические характеристики строительных материалов и, соответственно, будут рассмотрены только однослойные строительные конструкции. Звукоизоляция однослойной конструкции зависит от модуля упругости и плотности ее материала, а также от геометрических свойств элементов конструкции [16]. Однако конструктивные изменения, необходимые для увеличения жесткости при изгибе и, соответственно, для снижения звукового давления, обычно не рекомендуются, поскольку они экономически невыгодны [8]. Рекомендуется контролировать уровень звукового давления с помощью конструктивного или архитектурного решения. Например, при проектировании здания *Broadcasting House* в Копенгагене акустические характеристики внутренних помещений контролировались углом поворота подвесных вертикально перфорированных панелей [5]. Другой проектный метод контроля акустических

параметров – использование экранирования. Эффективность экранирования участков, расположенных на пути распространения звука, составляет 3–5 дБ на низких и 10–15 дБ – на высоких частотах [19].

Понятия шума и звука часто не различают, но они совершенно разные, поскольку шум (колебания без регулярной зависимости) субъективен и зависит от особенностей восприятия звука человеком. Проектировщики должны учитывать это при рассмотрении прохождения шума через конструкцию, особенно в городе. Из-за того что в городских условиях трудно уменьшить громкость или уровень звука, часто принимаются меры по снижению шума. Акустические свойства материала определяются как способность уменьшать передачу звука через него. Плотные барьеры относительно небольшой толщины отражают звуковую энергию. Исследования [1, 21] определили бетон как хороший изолятор, который благодаря своей высокой плотности может отражать до 99% звуковой энергии. Однако обычный бетон – плохой звукопоглотитель, поскольку может вызвать эхо в закрытых помещениях, в то время как более легкие и пористые материалы поглощают шум и удерживают его. Многие исследователи работали над улучшением свойств материалов (в частности, акустических характеристик), которые применяются в различных областях строительства [7, 12, 18, 22, 25, 27, 28, 34, 35]. Однако они редко принимали во внимание основы сохранения звука, звукопоглощающие свойства и их переменные.

Характеристики звука настолько многозначны, что нужно было решить проблему их упрощения и классификации. В частности, Jeon и соавторы [18] составили классификацию ударного шума по тяжелому полу в многоквартирных домах с использованием равной интервальной шкалы. Они проанализировали 33 различных ощущения звука человеком и разделили на 7 классов восприятие комфорта: от «тишины в комнате» до «невозможно находиться в комнате».

Таким образом, решение проблемы определения акустических характеристик и необходимой звукоизоляции конструкций позволили людям вот уже в течение пяти десятилетий жить в городских многоэтажных жилых комплексах. В настоящей статье мы предприняли попытку на основе анализа литературы дать широкий обзор методов измерения звукопоглощающих характеристик строительных материалов и звукоизоляции однослойных конструкций с целью систематизации для облегчения задачи будущим исследователям и проектировщикам. Для этого нам необходимо выполнить всесторонний обзор способов измерения звукопоглощения материалов с помощью: 1) ревербационной камеры, 2) импедансной трубы, 3) звукоизоляции воздушного шума, 4) определения уровней звукового давления.

Измерение звукопоглощения в ревербационной камере

В России измерение звукопоглощения в ревербационной камере производится согласно ГОСТ 31704 – модифицированной версии EN-ISO 354:2003. Объем ревербационных камер варьируется в пределах от 200 до 500 м³. Для обеспечения диффузности звукового поля в камере применяются вращающиеся рассеиватели. Площадь стандартного звукопоглощающего образца – 10–12 м², однако в экспериментальных работах (см., например [11]) площадь исследуемого образца составляла всего 2 м². Время реверберации измеряется 12 раз в разных точках камеры, вычисляется среднее арифметическое значение; при этом сравнивается время реверберации камеры без образца и со звукопоглощающим образцом. Зная время реверберации, по формуле Сэбина вычисляется эквивалентная площадь звукопоглощающего образца [10, 31]. Далее вычисляется коэффициент звукопоглощения α_s как отношение эквивалентной площади звукопоглощающего образца к его площади. Согласно ГОСТ 31704, ISO 354:2003 и ASTM C 423-17, измерения проводятся для третьоктавных полос со следующими среднегеометрическими частотами, Гц: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000.

Коэффициент акустического поглощения α считается ключевым параметром для оценки способности поглощать звук в материале. Он варьируется от 0,0 до 1,0, где 0 обозначает звукоотражающий материал, а 1 – идеальный звукопоглощающий материал. Согласно ASTM C423-17 вычислялись такие характеристики, как коэффициент уменьшения шума (noise reduction coefficient – NRC) и среднее значение звукопоглощения (sound absorption average – SAA) [12, 27, 35]. NRC является одним из самых простых методов, который представляет собой средний арифметический коэффициент звукопоглощения на частотах 250, 500, 1000 и 2000 Гц. Точно так же SAA – среднее арифметическое коэффициентов акустического поглощения на двенадцати 1/3 октавных частотах в диапазоне от 200 до 2500 Гц согласно ASTM C423-17. В связи с тем что NRC рассчитывается с использованием только 4 точек данных, тогда как SAA – 12 точек (200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 Гц), SAA является более адекватным для описания акустических характеристик. Для сравнения: в отечественной научной школе принято находить среднеарифметическую величину только для трех частот (500, 1000 и 2000 Гц) [2].

На рис. 2 показано, что все материалы могут поглощать определенную долю акустической энергии. Некоторые материалы, например мрамор, плохо поглощают звук, отражая наибольшую энергию, которая падает на наружные поверхности, хотя другие материалы, например изоляция из стекловолокна, могут поглощать большую часть падающего звука. NRC также широко применяется для определения общих акустических характеристик офисных экранов, перегородок, потолочных панелей, акустических перегородок и баннеров.

Рис. 2. NRC строительных материалов [7, 20, 28].

Следует отметить, что на низких частотах (ниже 100 Гц) точные результаты измерений по методикам ISO 354:2003 и ГОСТ Р ИСО 3382-2: 2008 не могут быть получены из-за низкочастотных колебаний реверберационной камеры.

Измерение звукопоглощения в импедансной трубе

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. Измерения звукопоглощения в импедансной трубе эффективны для фундаментальных исследований и разработок звукопоглощающих материалов. Метод испытания в соответствии с ISO 10534-2:1998 и ASTM C 384-04 включает использование импедансной трубы (трубы Кундта), двух разнорасположенных микрофонов и цифровой системы частотного анализа для определения звукопоглощения строительных материалов. Он также может быть использован

для определения акустического сопротивления поверхности. Сначала метод применялся с использованием трех микрофонов (два перед образцом и третий – за ним) [35]. Края образцов закрывались тефлоновой лентой, смазанной тонким слоем вазелина. Модификация этого метода, выполненная Фенгом [12], стала основой стандарта ISO 10534. В стандартной конфигурации импедансная труба опирается на жесткую пластину, что исключает вибрации, а в модифицированном методе применяется труба с концом, выходящим в безэховое помещение, соответственно, 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.

Определение звукоизоляции воздушного шума

СП 20-103-2003 и ГОСТ Р 56769 (модифицированная версия ISO 717-1) применяются в Российской Федерации для определения характеристик звукоизоляции воздушного шума. Эти стандарты определяют числовые параметры звукоизоляции строительных конструкций (стены, полы, двери, окна), а также учитывают спектры различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Индекс звукоизоляции от воздушного шума R_w считается фундаментальным параметром для лабораторных испытаний ограждающих конструкций: он учитывает диапазон частот в третьоктавных полосах от 100 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 и их обозначения адаптации спектра: розовый шум и дорожный шум – C и C_{tr} . В проекте стандарта ISO / DIS 16717-1 использовались три коэффициента: R_{living} , R_{speech} и $R_{traffic}$, заменяющие «старую» концепцию коэффициента звукоизоляции от воздушного шума. Гризотто и Ди Белла [11], а также Машович [26] 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 несколько проблем. 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 могут использоваться только для «дополнительной информации». Стандарт ISO 10140 дает завышенную оценку R на частотах ниже 100 Гц по сравнению со значениями, полученными на основе измерений интенсивности звука. Однако использование метода интенсивности хотя и возможно, но связано со сложностями. ISO / DIS 16717-1 рассматривают диапазон 50–5000 Гц только для одночисловых значений. Вероятно, решением всех этих проблем было бы рассмотрение новых показателей – от 100 до 5000 Гц с возможностью расширения до 50 Гц.

Определение уровней звукового давления

В нашей стране уровни звукового давления оцениваются с помощью СП 51.13330.2011, а также ГОСТ 31296.2, который является модифицированной версией ISO 1996-2. С помощью микрофонов определяются эквивалентные уровни звукового давления, в том числе и для низких частот. Для измерения воздушного шума, проходящего между комнатами или через фасад, времени реверберации и других акустических характеристик помещений, звукопоглощения в реверберационной комнате и уровня вибраций и коэффициента потерь применяется ISO 18233. Индекс приведенного уровня ударного шума через полы и сопряженные с ними конструкции определяется в соответствии с ASTM E1007-19.

Сводный перечень стандартов для определения характеристик звукопоглощения материалов и звукоизоляции конструкций приведен в таблице. Переводные версии некоторых из этих норм нашли отражение в отечественных стандартах (ГОСТ 31206.2, ГОСТ 56769, ГОСТ 12354-1, ГОСТ 31704, ГОСТ 31705, ГОСТ 54570, ГОСТ ИСО 3382, ГОСТ ИСО 10140).

Стандарты для определения характеристик звукопоглощения материалов и звукоизоляции конструкций

Ссылки	Стандарты	Измеряемые характеристики	Интервал	Инструменты	Применение	Ограничения и преимущества
Измерение звукопоглощения в реверберационной камере						
[12]	ГОСТ 31704 (ISO 354:2003. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room)	Коэффициент звукопоглощения α , Время реверберации T , с	0.0–1.0 0.4–5.0	Реверберационная камера, источники звука, микрофоны	Измерение звукопоглощения в реверберационной камере	Объем реверберационной камеры – 200–500 м ³ . Площадь образца – 10–12 м ²
[10]	ASTM C423-17. Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method	Коэффициент звукопоглощения α , Noise reduction coefficient, NRC Sound absorption average, SAA	0.0–1.0 0.0–1.0 0.0–1.0	Реверберационная камера, источники звука, микрофоны	Измерение звукопоглощения помещения, поглощения объекта, например экрана офиса, и коэффициентов звукопоглощения материала, например акустической потолочной плитки	На частотах ниже 100 Гц точные результаты измерений не могут быть получены из-за низкой плотности мод (собственных частот) колебаний реверберационной камеры
[9]	ГОСТ Р (ISO 3382-2:2008). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Reverberation time in ordinary rooms)	Время реверберации T , с	0.4–5.0	Реверберационная камера, источники звука, микрофоны	Коррекция других акустических измерений, например, уровня звукового давления от источников звука или измерений звукоизоляции	На частотах ниже 100 Гц точные результаты измерений не могут быть получены из-за низкой плотности мод (собственных частот) колебаний реверберационной камеры
Измерение звукопоглощения в импедансной трубе						
[2, 11, 23, 32]	ISO 10534-2:1998. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes	Коэффициент звукопоглощения α , Z – импеданс при нормальном падении звука, м ²	0.0–1.0 >20	Импедансная труба, два микрофона и цифровая система частотного анализа	Определение коэффициента звукопоглощения и импеданса в импедансных трубах	Стандарт не ставит своей целью решение всех проблем безопасности, связанных с его использованием
[33]	ASTM C384-04(2016). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method	Коэффициент звукопоглощения α , Z – импеданс при нормальном падении звука, м ²	0.0–1.0 >20	Импедансная труба, два микрофона и цифровая система частотного анализа	Определение коэффициента звукопоглощения и импеданса в импедансных трубах	Стандарт не ставит своей целью решение всех проблем безопасности, связанных с его использованием

[37]	ASTM E1050-19. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System	Коэффициент звукопоглощения α , Z – импеданс при нормальном падении звука, м ²	0.0-1.0 >20	Импедансная труба, два микрофона и цифровая система частотного анализа	Определение нормальных коэффициентов звукопоглощения и импеданса при нормальном падении звука материалов	Диапазон измеряемых частот – от 0 до 1600 Гц, ограничен фиксированным диаметром импедансной трубы
Измерение звукоизоляции воздушного шума						
	СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий	Индекс звукоизоляции воздушного шума R_w , дБ Индекс приведенного уровня ударного шума R_{nw} , дБ	34–62 45–68	Измерения сопоставляются с оценочной кривой, приведенной в этом своде правил	Определение характеристик звукоизоляции ограждающих конструкций	Свод правил приводит ряд примеров расчета
[12]	ГОСТ Р 56769 (ISO 717-1:2006). Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Airborne sound insulation	Индекс звукоизоляции воздушного шума R_w , дБ	33–56	Метод, с помощью которого параметры изоляции воздушного шума в полосах частот можно преобразовать в одно число, что дает комплексную оценку звукоизоляционных свойств оцениваемой конструкции	а) определяет величины звукоизоляции воздушного шума в зданиях и элементах здания (стены, полы, двери и окна); б) учитывает различные спектры уровня звука различных источников шума (внутри и вне здания); в) дает правила определения этих величин по результатам измерений, проведенных в третьоктавной или октавной полосах в соответствии с ISO 10140-2 и ISO 140-4	Для лабораторных измерений, выполненных в соответствии с ISO 10140, одночисловые величины должны рассчитываться с использованием только одной октавной полосы
[31]	ISO/DIS 16717-1. Acoustics. Evaluation of sound insulation	R_{living} , дБ R_{speech} , дБ R_{traffic} , дБ	0–30 0–30 0–30	Громкоговоритель	Оценка звукоизоляции в помещениях	Возможность измерения в лаборатории показателей снижения звука для частот ниже 100 Гц с

	spectra by single numbers. Airborne sound insulation					использованием современных стандартов измерения
[11]	EN 12354-1:2000. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements	Индекс звукоизоляции воздушного шума R_w	26–74	Расчет	Определяет величины звукоизоляции воздушного шума в зданиях и таких элементах здания, как стены, полы, двери и окна	Расчетная модель упрощена и имеет несколько ограничений
[17, 37]	ISO 10140 series Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements.	Индекс звукоизоляции воздушного шума R_w	26–74	Измерения выполняются в лабораторных испытательных установках, в которых подавляется передача звука по боковым каналам	Лабораторные методы измерения ударной звукоизоляции половых покрытий. Результаты могут быть использованы для сравнения звукоизоляционных свойств строительных конструкций	ISO 10140 (все части) был создан для улучшения лабораторных измерений, обеспечения согласованности и упрощения будущих изменений и дополнений, касающихся условий монтажа испытательных элементов при лабораторных и полевых измерениях
[6]	ISO 140-5. Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 5: Field Measurements of Airborne Sound Insulation of Façade Elements and Façades	Время реверберации T , с Коэффициент звукопоглощения α ,	0.4–5.0 0.0–1.0	Громкоговоритель	Определяет две серии методов (элементные и общие) для измерения звукоизоляции элементов фасада и целых фасадов. Элементные методы применяются для оценки индекса уменьшения звука фасадного элемента, например окна	Отменен в 2016 г. и заменен на ISO 16283-1:2014 и ISO 16283-3:2016
	ISO/DIS 16283-1:2012. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.	Уровень звукового давления, дБ Время реверберации T , с Фоновый шум	0–140 0.4–5.0	Громкоговоритель	Результаты испытаний могут использоваться для количественной оценки и сравнения воздушной звукоизоляции в немеблированных и меблированных помещениях, где звуковое поле может приближаться или не приближаться к диффузному полю	Эта часть ISO 16283 устанавливает процедуры для определения звукоизоляции в воздухе между двумя комнатами в здании с использованием измерений звукового давления. Эти процедуры предназначены для комнат объемом от 10 до 250 м ³ в диапазоне частот от 50 до 5000 Гц

	ISO 16283-3. Acoustics – Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 3: Façade Sound Insulation.	Индекс звукоизоляции воздушного шума R_w	26–74	Метод «ручного сканирования микрофона»	Результаты испытаний могут использоваться для количественной оценки и сравнения воздушной звукоизоляции фасадов, где звуковое поле может приближаться к диффузному полю	Эта часть ISO 16283 устанавливает процедуры для определения звукоизоляции фасадов в диапазоне частот от 50 до 5000 Гц
[14, 36]	ISO 15186-2. Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements Using Sound Intensity – Part 2: Field Measurements	Коэффициент звукопоглощения α , Время реверберации T , с	0.0–1.0 0.4–5.0	Расчет погрешности измерения одночисловой звукоизоляции воздушного шума	Метод измерения интенсивности звука для определения звукоизоляции стен, полов, дверей, окон и небольших строительных элементов. Он предназначен для измерений, которые должны производиться при наличии фланкирующей передачи	Воспроизводимость этого метода интенсивности оценивается как равная или лучше, чем у методов ISO 140-10 и ISO 140-4, при измерении одного малого и большого строительного элемента соответственно
	ISO 15186-3:2002. Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity. Laboratory measurements at low frequencies.	Коэффициент звукопоглощения α , Время реверберации T , с	0.0–1.0 0.4–5.0	Расчет погрешности измерения одночисловой звукоизоляции воздушного шума	Метод измерения интенсивности звука для определения индекса звукоизоляции и импеданса при нормальном падении звука на низких частотах	Воспроизводимость этого метода для всех частот оценивается равной или лучшей, чем при использовании метода ISO 140-3 при 100 Гц. Результаты более независимы от размеров помещения лаборатории и ближе к значениям, которые будут измеряться между помещениями объемом более 300 м ³ . Эта часть ISO 15186 применяется в диапазоне частот от 50 до 160 Гц.
[4]	EN 1793-2:2011. Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Intrinsic characteristics of airborne sound insulation under diffuse sound field conditions.	Коэффициент звукопоглощения α	0.0–1.0	Экспериментальное определение акустических характеристик	Для проектирования дорожных акустических барьеров	Не всегда удастся получить стабильно воспроизводимые результаты

[3]	СП 51.13330-2011. Защита от шума	Октавные уровни звукового давления L , дБ Требуемое снижение уровней шума $\Delta L_{тр}$, дБ	0–85 в зависимости от вида помещения	Расчет	Для измерения характеристик защиты от шума	Применяется в Российской Федерации
[15, 24]	ГОСТ 31296.2 (ISO 1996-2. Acoustics – Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise – Part 2: Determination of Sound Pressure Levels)	Эквивалентный уровень звукового давления L_{eq} , импульсный шум, низкочастотный шум, остаточный шум	Широкий спектр	Использование 1/3-октавного спектра для выявления различных звуковых тонов	Для исследования различных частотных характеристик	Достаточно гибкий методический инструмент, позволяющий извлекать максимум из имеющихся лабораторных установок.
[29]	ISO 18233. Acoustics – Application of New Measurement Methods in Building and Room Acoustics	Средний уровень звукового давления L_1 в точке S , передаточный коэффициент, передаточная характеристика	Широкий спектр	Методы передаточных функций	Для измерения: воздушного шума, проходящего между комнатами или через фасад; времени реверберации и других акустических характеристик помещений; звукопоглощения в реверберационной камере; уровня вибраций и коэффициента потерь	Новые методы имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими, например выделение фонового шума и расширение диапазона измерений. Однако возрастает риск получения недостоверных результатов в случае отклонения от процедуры метода. Новые методы могут продемонстрировать большую чувствительность к изменению времени и условий среды, чем классические методы
[30, 31]	ASTM E1007-19. Standard Test Method for Field Measurement of Tapping Machine Impact Sound Transmission Through Floor-Ceiling Assemblies and Associated Support Structures	Характеристики ударного шума	Широкий спектр	Стандартная «топальная» машина	Для измерения передачи ударного шума через полы и сопряженные с ними конструкции в полевых условиях	Результаты применимы для всех типов напольных конструкций

Заключение

Таким образом, мы систематизировали ряд методов исследования звукопоглощающих характеристик строительных материалов и звукоизоляции конструкций, к которым, по нашему мнению, следует относиться весьма осмотрительно. Практически все эти методы имеют ограничения, накладываемые характеристиками экспериментальных установок и размерами исследуемых образцов. Нормативные документы, в которых изложены данные методы, являются наиболее актуальными для адекватной количественной оценки характеристик звукопоглощения строительных материалов и звукоизоляции конструкций. Именно поэтому некоторые приведенные нормы имеют переводные отечественные версии.

Настоящий обзор может быть полезен инженерам-конструкторам для расширения теоретической базы международного нормирования звукопоглощения строительных материалов и звукоизоляции однослойных конструкций.

Вклад авторов в статью: Р.С. Федюк – общее руководство, формулирование цели, задач и выводов, работа с текстом статьи, основной вклад в ее написание; А.В. Баранов – изучение степени разработанности темы, работа с текстом статьи; Р.А. Тимохин – выведение зависимостей, оформление графиков, написание и оформление статьи; А.П. Свинцов – научное консультирование, работа с итоговой таблицей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика. М.: Техносфера, 2004. 488 с.
2. Пат. 190244 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Установка для исследования динамических характеристик звукоизоляционных материалов / С.Н. Овсянников, Д.С. Скрипиченко; ТГАСУ. № 2018137873; заявл. 26.10.18; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 2. 3 с.
3. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горештейн И.В. и др. Борьба с шумом на производстве: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
4. Arenas C., Leiva C., Vilches L.F., Cifuentes H., Rodríguez-Galán M. Technical specifications for highway noise barriers made of coal bottom ash-based sound absorbing concrete, *Construction and Building Materials*. 2015;95:585–591.
5. Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov K.V. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*. 2012(Nov. 4);19:283–311. DOI:10.1260/1351-010X.19.4.283
6. Bąkowski A., Radziszewski L., Dekys V. Modelling of road traffic noise. *MATEC Web Conf*. 157. 2018. DOI:10.1051/mateconf/201815702001
7. Berardi U. The position of the instruments for the sound insulation measurement of building façades: From ISO 140-5 to ISO 16283-3. *Noise Control Engineering J*. 2013;61(1):70–80. DOI:10.3397/1.3702007
8. Calleri C., Astolfi A., Shtrepi L., Prato A., Schiavi A., Zampini D., Volpatti G. Characterization of the sound insulation properties of a two-layers lightweight concrete innovative façade. *Appl. Acoust.* 2019;145:267–277. DOI:10.1016/j.apacoust.2018.10.003
9. 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;157:839–851. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161
10. 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;120:77–83. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.007
11. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements. *Proc. Forum Acust. Krakow*, 2014, p. 1–4. DOI: 10.13140/2.1.5063.3280
12. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials. *Appl. Acoust.* 2013;74(12):1480–1485. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.06.013
13. Flores Medina N., Flores-Medina D., Hernández-Olivares F. Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;129:25–36. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007

14. Garg N., Gandhi L., Kumar A., Kumar P., Saini P.K. Measurement uncertainty in airborne sound insulation and single-number quantities using sound pressure and sound intensity approaches. *Noise Control Engineering J.* 2016;64(2):153–169. DOI: 10.3397/1/376368
15. Glé P., Gourdon E., Arnaud L., Horoshenkov K.V., Khan A. The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013;134(6):4698. DOI: 10.1121/1.4824931
16. Hoeller C., Mahn J. Some practical issues affecting repeatability and reproducibility in laboratory transmission loss tests. *J. of Acoustic Society American.* 2017;141(5):3928. DOI: 10.1121/1.4988881
17. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials.* 2014;73:195–204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107
18. Jeon J.Y., Hong J.Y., Kim S.M., Lee P.J. Classification of heavy-weight floor impact sounds in multi-dwelling houses using an equal-appearing interval scale. *Buildings and Environment.* 2015;94(2):821–828. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.021
19. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Buildings and Environment.* 2019;156:12–20. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.03.061
20. Kim H., Hong J., Pyo S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete. *Applied Acoustics.* 2018;138:171–178. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.04.002
21. Kinnane O., Reilly A., Grimes J., Pavia S., Walker R. Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials.* 2016;122:674–682. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106
22. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharensko Yu.V., Klyuev A.V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research. *Materials Science Forum.* 2018;931:598–602.
23. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. of Sound and Vibration.* 2015;353:378–394. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.05.030
24. Maivel M., Kurnitski J., Kalamees T. Field survey of overheating problems in Estonian apartment buildings. *Archit. Sci. Rev.* 2015;58(1):1–10. DOI: 10.1080/00038628.2014.970610
25. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Constr. Build. Mater.* 2015;101(1):184–191. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142
26. 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;134(5):EL420. DOI: 10.1121/1.4824629
27. Monteiro C.R.A., Machimbarrena M., Pedersoli S., Smith S., Johansson R. Contribution to uncertainty of in-situ airborne sound insulation Measurements. 42nd Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. 2013, Innsbruck. DOI: 10.13140/2.1.2591.7760
28. Oancea I., Bujoreanu C., Budescu M., Benchea M., Grădinaru C.M. Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *J. of Cleaner Production.* 2018;203:301–312. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.273
29. Öqvist R., Ljunggren F., Johnsson R. Walking sound annoyance vs. impact sound insulation from 20 Hz. *Appl. Acoust.* 2018;135:1–7. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.01.019
30. 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;94(2):793–801. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.005
31. Stolz J., Boluk Y., Bindiganavile V. Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2018;94:24–23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2018. 08.004
32. Sun P., Guo Z. Preparation of steel slag porous sound-absorbing material using coal powder as pore former. *J. of Environmental Science [China].* 2015;36:67–75. DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.010.
33. Wright L.A., Kemp S., Williams I. “Carbon footprinting”: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management.* 2011;2(1):61–72. DOI: 10.4155/cmt.10.39
34. Yoo S.Y., Jeon J.Y. Investigation of the effects of different types of interlayers on floor impact sound insulation in box-frame reinforced concrete structures. *Build. Environ.* 2014;76:105–112. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.008
35. Zagubień A., Wolniewicz K. The impact of supporting tower on wind turbine noise emission. *Appl. Acoust.* 2019;155:260–270. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.05.032

36. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015;62:97–105. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013
37. Zhuang X.Y., Chen L., Komameni 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.* 2016;125:253–267. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-13>

Fediuk R., Baranov A., Timokhin R., Svintsov A.

ROMAN FEDIUK, Candidate of Engineering Sciences, Professor (corresponding author),

ORCID: 0000-0002-2279-1240, fedyuk.rs@dvfu.ru

ANDREY BARANOV, Postgraduate student, ORCID: 0000-0002-6024-4635,
de_montgomery@mail.ru

ROMAN TIMOKHIN, Student, ORCID: 0000-0002-6105-2037, romantimohin686@gmail.com

Politechnical Institute, *Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

ALEKSANDR SVINTSOV, Doctor of Engineering Sciences, Professor,

ORCID: 0000-0002-7645-5103, svintsovap@rambler.ru

Peoples' Friendship University of Russia

Moscow, Russia

Methods for determining the characteristics of sound absorption of building materials and sound insulation of structures (review)

Abstract: The study of the acoustic characteristics of building materials and structures is necessary for provision of comfortable life of people in urban conditions. Despite the fact that in the normative documents of developed countries there are a number of methods for their determination, there is still no common understanding of the characteristics themselves and the ways of their adequate determination. In this work we tried to systematize and give a critical review of regulatory documents containing the methods for determining the sound-absorbing properties of materials and the sound-insulating characteristics of structures. For the first time the regularities in determination the characteristics of sound absorption and sound insulation inherent in different methods have been revealed. The most characteristic indicators of sound absorption have been determined. The ranking of the most commonly used building materials was made according to the noise reduction factor (NRC). The areas of application of the considered methods are presented, their advantages and limitations are analyzed.

Keywords: noise reduction factor, sound absorber, impedance tube, reverberation chamber

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 27.02.2020; reviewed: 06.04.20 and 20.04.2020; accepted: 26.10.2020; financing: Far Eastern Federal University.

REFERENCES

1. Blazi V. Designer's Handbook. Building physics. M., Tekhnosfera, 2004. 488 p.
2. Pat. 190244 Russian Federation, MPK7 N 04 V 1/38, N 04 J 13/00. Installation for research of dynamic characteristics of soundproof materials / S.N. Ovsyannikov, D.S. Skripichenko; TSUACE. N 2018137873; declared 10/26/18; publ. 06/25/2019, Bul. N 2. 3 p.
3. Yudin E.Ya., Borisov L.A., Goreshtein I.V. et al. The fight against noise in production: Handbook, M., Mechanical Engineering, 1985, 400 p.

4. Arenas C., Leiva C., Vilches L.F., Cifuentes H., Rodríguez-Galán M. Technical specifications for high-way noise barriers made of coal bottom ash-based sound absorbing concrete, *Construction and Building Materials*. 2015;95:585–591.
5. Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov K.V. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*. 2012(Nov. 4);19:283–311. DOI: 10.1260/1351-010X.19.4.283
6. Bąkowski A., Radziszewski L., Dekys V. Modelling of road traffic noise. *MATEC Web Conf.* 157. 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201815702001
7. Berardi U. The position of the instruments for the sound insulation measurement of building façades: From ISO 140-5 to ISO 16283-3. *Noise Control Engineering J.* 2013;61(1):70–80. DOI: 10.3397/1.3702007
8. Calleri C., Astolfi A., Shtrepi L., Prato A., Schiavi A., Zampini D., Volpatti G. Characterization of the sound insulation properties of a two-layers lightweight concrete innovative façade. *Appl. Acoust.* 2019;145:267–277. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.10.003
9. 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;157:839–851. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161
10. 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;120:77–83. DOI: 10.1016/j.bio-mbioe.2018.11.007
11. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements. *Proc. Forum Acust. Krakow*, 2014, p. 1–4. DOI: 10.13140/2.1.5063.3280
12. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials. *Appl. Acoust.* 2013;74(12):1480–1485. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.06.013
13. Flores Medina N., Flores-Medina D., Hernández-Olivares F. Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;129:25–36. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007
14. Garg N., Gandhi L., Kumar A., Kumar P., Saini P.K. Measurement uncertainty in airborne sound insulation and single-number quantities using sound pressure and sound intensity approaches. *Noise Control Engineering J.* 2016;64(2):153–169. DOI: 10.3397/1/376368
15. Glé P., Gourdon E., Arnaud L., Horoshenkov K.V., Khan A. The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013;134(6):4698. DOI: 10.1121/1.4824931
16. Hoeller C., Mahn J. Some practical issues affecting repeatability and reproducibility in laboratory transmission loss tests. *J. of Acoustic Society American*. 2017;141(5):3928. DOI: 10.1121/1.4988881
17. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*. 2014;73:195–204. DOI: 10.1016/j.con-buildmat.2014.09.107
18. Jeon J.Y., Hong J.Y., Kim S.M., Lee P.J. Classification of heavy-weight floor impact sounds in multi-dwelling houses using an equal-appearing interval scale. *Buildings and Environment*. 2015;94(2):821–828. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.021
19. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Buildings and Environment*. 2019;156:12–20. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.03.061
20. Kim H., Hong J., Pyo S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete. *Applied Acoustics*. 2018;138:171–178. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.04.002
21. Kinnane O., Reilly A., Grimes J., Pavia S., Walker R. Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*. 2016;122:674–682. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106
22. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharensko Yu.V., Klyuev A.V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research. *Materials Science Forum*. 2018;931:598–602.
23. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. of Sound and Vibration*. 2015;353:378–394. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.05.030
24. Maivel M., Kurnitski J., Kalamees T. Field survey of overheating problems in Estonian apartment buildings. *Archit. Sci. Rev.* 2015;58(1):1–10. DOI: 10.1080/00038628.2014.970610
25. Martins C., Santos P., Almeida P., Godinho L., Dias A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Constr. Build. Mater.* 2015;101(1):184–191. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142

26. 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;134(5):EL420. DOI: 10.1121/1.4824629
27. Monteiro C.R.A., Machimbarrena M., Pedersoli S., Smith S., Johansson R. Contribution to uncertainty of in-situ airborne sound insulation Measurements. 42nd Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. 2013, Innsbruck. DOI: 10.13140/2.1.2591.7760
28. Oancea I., Bujoreanu C., Budescu M., Benchea M., Grădinaru C.M. Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *J. of Cleaner Production.* 2018;203:301–312. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.273
29. Öqvist R., Ljunggren F., Johnsson R. Walking sound annoyance vs. impact sound insulation from 20 Hz. *Appl. Acoust.* 2018;135:1–7. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.01.019
30. 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;94(2):793–801. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.005
31. Stolz J., Boluk Y., Bindiganavile V. Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2018;94:24–23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2018. 08.004
32. Sun P., Guo Z. Preparation of steel slag porous sound-absorbing material using coal powder as pore former. *J. of Environmental Science [China].* 2015;36:67–75. DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.010.
33. Wright L.A., Kemp S., Williams I. “Carbon footprinting”: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management.* 2011;2(1):61–72. DOI: 10.4155/cmt.10.39
34. Yoo S.Y., Jeon J.Y. Investigation of the effects of different types of interlayers on floor impact sound insulation in box-frame reinforced concrete structures. *Build. Environ.* 2014;76:105–112. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.008
35. Zagubień A., Wolniewicz K. The impact of supporting tower on wind turbine noise emission. *Appl. Acoust.* 2019;155:260–270. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.05.032
36. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites.* 2015;62:97–105. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013
37. 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.* 2016;125:253–267. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019