

Научная статья
УДК 691.33
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>
EDN: OALHEO



ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ ГАЗОБЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ-УНОСА КИТАЯ

Сяо Вэньсюй

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
xiao@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2581-1876>

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка газобетонов с повышенным содержанием открытых пор, с применением полиминеральных вяжущих со сниженной цементоемкостью и значительной утилизацией местных техногенных ресурсов (в частности обогащенных отходов предприятий теплоэнергетики) актуальна для современной строительной индустрии. Для систематизации современных методов изучения характеристик звукоизоляции и звукозащиты зданий необходимо учитывать многообразие международных строительных норм. Целью работы является освоение научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение эффективных газобетонов на основе золы-уноса Китая с улучшенными звукопоглощающими характеристиками.

Материалы и методы. В данной работе использована методологическая основа, которая предусматривает всестороннее использование фундаментальных подходов в строительном материаловедении. Для разработки композиционных материалов заданного качества на нано-, микро- и макроуровнях было применено комплексное проектирование. Физико-механические свойства сырья и требуемые характеристики разработанных материалов изучались с использованием физико-химических методов анализа, включая лазерную гранулометрию, рентгенофазовый анализ, электронную сканирующую микроскопию, термические методы и т.д. Экспериментальные исследования проведены в лабораториях БГТУ им. В.Г. Шухова, а также китайских университетов.

Заключение. В данной работе были сформулированы научные подходы для проектирования и синтеза газобетонов с улучшенными акустическими характеристиками в различных регионах страны, с учетом местного сырья. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение ассортимента легких материалов для ограждающих конструкций с целью обеспечения безопасной среды обитания человека. Это может быть достигнуто путем синтеза многокомпонентных композиционных вяжущих, которые влияют на формирование нано-, микро- и макроструктуры материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, материаловедение, сооружение, изоляция, шум, композит, уровень звука, человек, газобетон, ячеистый бетон

Статья поступила в редакцию 28.06.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сяо Вэньсюй. Звукопоглощающие газобетоны на основе золы-уноса Китая // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>

© Вэньсюй С., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>
EDN: OALHEO

SOUND-ABSORBING AERATED CONCRETE BASED ON CHINA FLY ASH

Xiao Wenxu

V. G. Shukhov Belgorod State Technological Universit,
Russia, Belgorod
xiao@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2581-1876>

ABSTRACT

Introduction. The development of aerated concrete with a high content of open pores, using polymineral binders with reduced cement content and significant utilization of local technogenic resources (in particular, enriched waste from thermal power plants) is relevant for the modern construction industry. To systematize modern methods for studying the characteristics of sound insulation and sound protection of buildings, it is necessary to take into account the diversity of international building codes. The aim of the work is to develop a scientifically based technological solution that provides effective aerated concrete based on fly ash from China with improved sound-absorbing characteristics.

Main part. In this paper, a methodological basis, which provides for the comprehensive use of fundamental approaches in building materials science, was used. Integrated design to develop composite materials of a given quality at the nano-, micro- and macrolevels was used. The physical and mechanical properties of raw materials and the required characteristics of the developed materials using physicochemical methods of analysis, including laser granulometry, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, thermal methods, etc were studied. The experimental studies in the laboratories of V.G. Shukhov BSTU, as well as Chinese universities were carried out.

Conclusions. In this work, scientific approaches for the design and synthesis of aerated concrete with improved acoustic characteristics in various regions of the country, taking into account local raw materials were formulated. Further research can be aimed at expanding the range of lightweight materials for building envelopes in order to ensure a safe human environment. This can be achieved by synthesizing multicomponent composite binders that affect the formation of nano-, micro- and macrostructures of materials.

KEYWORDS: construction, materials science, structure, insulation, noise, composite, sound level, man, aerated concrete, cellular concrete

The article was submitted 28.06.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors 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. Xiao Wenxu Sound-absorbing aerated concrete based on China fly ash. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>

© Wenxu X., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В результате проведенного теоретического обзора было выявлено, что на людей влияет комплекс акустических воздействий различных спектров [1, 2, 3, 4, 5]. Из этого следует, что актуальной задачей является проектирование композитов с заданной пористой структурой, способных эффективно поглощать акустическую энергию в различных диапазонах [6, 7, 8, 9, 10]. Для достижения этой цели необходимо контролировать формирование макро-, микро- и наноструктуры строительных материалов [11, 12, 13, 14, 15]. Важной особенностью звукопоглощающих материалов являются открытые поры, в которых звуковая энергия преобразуется в тепловую [16, 17, 18, 19, 20]. Однако материалы с открытой пористостью имеют высокую степень насыщения водой, что может негативно сказываться на эксплуатационных характеристиках их морозостойкости и долговечности. В связи с этим необходимо разработать высокопористые материалы, которые бы обладали нормативной прочностью и долговечностью [21, 22, 23, 24, 25]. Одним из таких материалов могут быть ячеистые бетоны, которые при экономии цемента могут использоваться для строительства несущих и ограждающих конструкций с тепло- и звукоизоляционными свойствами. Особенно перспективными являются малознергоемкие газобетоны, которые могут быть произведены как в автоклавных, так и в неавтоклавных условиях. Исходя из этого в статье выдвинута гипотеза о возможности разработки звукопоглощающих газобетонов путем контролируемого формирования макро-, микро- и наноструктуры с использованием полиминеральных систем и достижения значений открытой пористости более 40%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве компонентов композиционного вяжущего (КВ) применялись доступные материалы Китая: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (завод Хэбэй) и зола-уноса Хэбэйской ТЭЦ. В качестве заполнителей звукопоглощающих бетонов использовался пористый вспученный перлит и кварцевый песок с модулем крупности 1,7.

Математическое планирование экспериментов и определение порядка рандомизации проводилось с использованием статистического программного обеспечения Design-Expert с применением методологии Тагути. Оценка адекватности моделей была рассмотрена с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Качество выполнения работы подтверждается

использованием соответствующей нормативной документации на применяемые сырьевые ресурсы и методы исследований, а также учетом необходимого количества исследуемых образцов и повторных испытаний.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Применялась упрощенная модель пористой среды, предложенная Д. Маа [11], которая представляет собой многослойную перфорированную панель с воздушными прослойками между слоями. Эта модель была выбрана для моделирования звукопоглощения разработанного бетона из-за своей простоты, а также предположения однородной формы и диаметра воздушных полостей. С использованием электроакустической аналогии сопротивлений на основе этой модели можно вычислить коэффициент звукопоглощения α :

$$\alpha = \frac{4R/\rho_0 c_0}{(1 + R/\rho_0 c_0)^2 + (M/\rho_0 c_0)^2}, \quad (1)$$

здесь R и M выполняют роль действительных и мнимых элементов уравнения соответственно, ρ_0 – плотность воздуха, а c_0 – скорость звука в воздушной среде.

В теоретической модели указывается, что коэффициент звукопоглощения зависит от различных параметров, таких как радиус межпоровых промежутков, параметр формы заполнителей и целевая открытая пористость. Однако эта модель не учитывает влияние пористого заполнителя, который добавляется в состав бетона для поглощения звуковых волн, на коэффициент звукопоглощения. Поэтому одной из задач является усовершенствование расчетной формулы звукопоглощения ячеистых бетонов с учетом пористого заполнителя на основе экспериментальных результатов.

С учётом вышеизложенного разработана широкая номенклатура составов композиционных вяжущих, полученных совместным помолом портландцемента и золы-уноса в разных пропорциях в вихревой мельнице. Определено оптимальное содержание золы-уноса в составах композиционных вяжущих – 30–40%, и оптимальная удельная поверхность композиционных вяжущих – 500 м²/кг (таблица 1). Такая удельная поверхность достигается при пропуске композиционного вяжущего через вихревую установку один раз. Это позволяет минимизировать энергоёмкость производства КВ с достижением максимальной эффективности.

Таблица 1
Запроектированные газобетонные смеси
Источник: составлено автором.

Table 1
Designed aerated concrete mixes
Source: compiled by the authors.

Компоненты, кг/м ³	Номер состава												
	Изоляционные композиты				Конструкционно- изоляционные композиты				Конструкционные композиты				Контр.
	1Н	2А	3Н	4А	5Н	6А	7Н	8А	9Н	10А	11Н	12А	
Портландцемент	175	175	150	150	224	224	192	192	280	280	240	240	175
Зола-уноса	75	75	100	100	96	96	128	128	120	120	160	160	-
Вода	100	100	112,5	112,5	128	128	144	144	150	150	180	180	98
Алюминиевая пудра	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Каустическая сода	0,4	0,4	0,34	0,34	0,52	0,52	0,44	0,44	0,65	0,65	0,57	0,57	0,4
Суперпластификатор	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	-
Гидрофобизатор	0,25	0,25	0,25	0,25	0,32	0,32	0,32	0,32	0,4	0,4	0,4	0,4	-
Вспученный перлит	35	35	35	35	20	20	20	20	-	-	-	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	180	180	180	180	335	335	335	335	120
Полипропиленовая фибра	-	-	12	12	-	-	12	12	-	-	12	12	-
В/Т	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,56

Помимо того что все составы были рассчитаны с сохранением условий равноподвижности, также исследованы реологические свойства, доказывающие, что все запроектированные составы характеризуются набором свойств, дающих возможность обеспечивать удовлетворительную транспортировку газобетонной смеси к месту формирования.

Данные таблицы 2 показывают обратное соотношение между прочностью на сжатие и процентом общей пористости затвердевших газобетонных образцов.

Установлен характер влияния составов на плотность и пористость материалов. Лучший показатель по открытой пористости (49,9 и 45,6%) у газобетонных неавтоклавных композитов 1Н и 3Н (с соответствующей плотностью 314 кг/м³ и 329 кг/м³), у которых композиционное вяжущее включает в себя цемент и

золу-уноса. Неавтоклавные конструкционно-изоляционные композиты также показывают высокую открытую пористость (37,8 и 39,8%) относительно других образцов при плотностях в пределах 600 кг/м³. Конструкционные композиты имеют относительно высокую плотность, но при этом также обладают высокой открытой пористостью. Например, газобетонный образец 11Н имеет открытую пористость в размере 36,9%, несмотря на его высокую плотность (более 800 кг/м³). Добавление полипропиленовой фибры в бетон является эффективным способом повышения прочностных характеристик с незначительным влиянием на пористость. Однако замена перлита на кварцевый песок может увеличить прочность на сжатие, но при этом также снизить открытую пористость из-за лучшей упаковки частиц. Это может негативно сказываться на звукопоглощении.

Таблица 2
Зависимость между физико-механическими свойствами
и пористостью газобетонов на 28 сут
Источник: составлено автором.

Table 2
Dependence between physical and mechanical properties and porosity of aerated concrete for 28 days
Source: compiled by the authors.

Состав	$R_{ск}$, МПа	ρ , кг/м ³	Общая пористость, %	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %
1Н	1,0	314	84,2	49,9	34,3
2А	1,5	333	79,1	38,1	41,0
3Н	1,3	329	86,1	45,6	40,5
4А	1,6	340	79,8	39,9	39,9
контр.	1,0	319	59,8	30,7	29,1
5Н	3,9	579	69,8	39,8	30,0
6А	5,0	601	70,0	31,4	38,6
7Н	5,1	599	69,7	37,8	31,9
8А	5,9	622	70,7	34,6	36,1
9Н	7,5	814	63,6	34,1	29,5
10А	8,6	831	63,9	27,7	36,2
11Н	7,7	835	65,4	36,9	28,5
12А	9,1	852	63,3	29,2	34,1

Методология Тагучи показала, что параметр «соотношение заполнителя» имеет наибольшее влияние на прочность на сжатие и открытую пористость композита (рисунок 1). Увеличение содержания вспученного перлита приводит к увеличению открытой пористости, в то время как повышение содержания кварцевого песка способствует упрочнению ячеистого бетона.

Увеличение количества золошлаковой смеси оказывает незначительное влияние на оба

исследуемых параметра. Присутствие фибры повышает прочность на сжатие в среднем на 0,2 МПа, но снижает открытую пористость почти на 5%.

Микроструктурный анализ газобетонов показал, что пористость образцов представлена двумя типоразмерами пор. Первый тип – это воздушные ячейки с размерами около 1 мм. Второй тип – это первичные газовые поры (размер 0,1–0,4 мм) (рисунок 2).

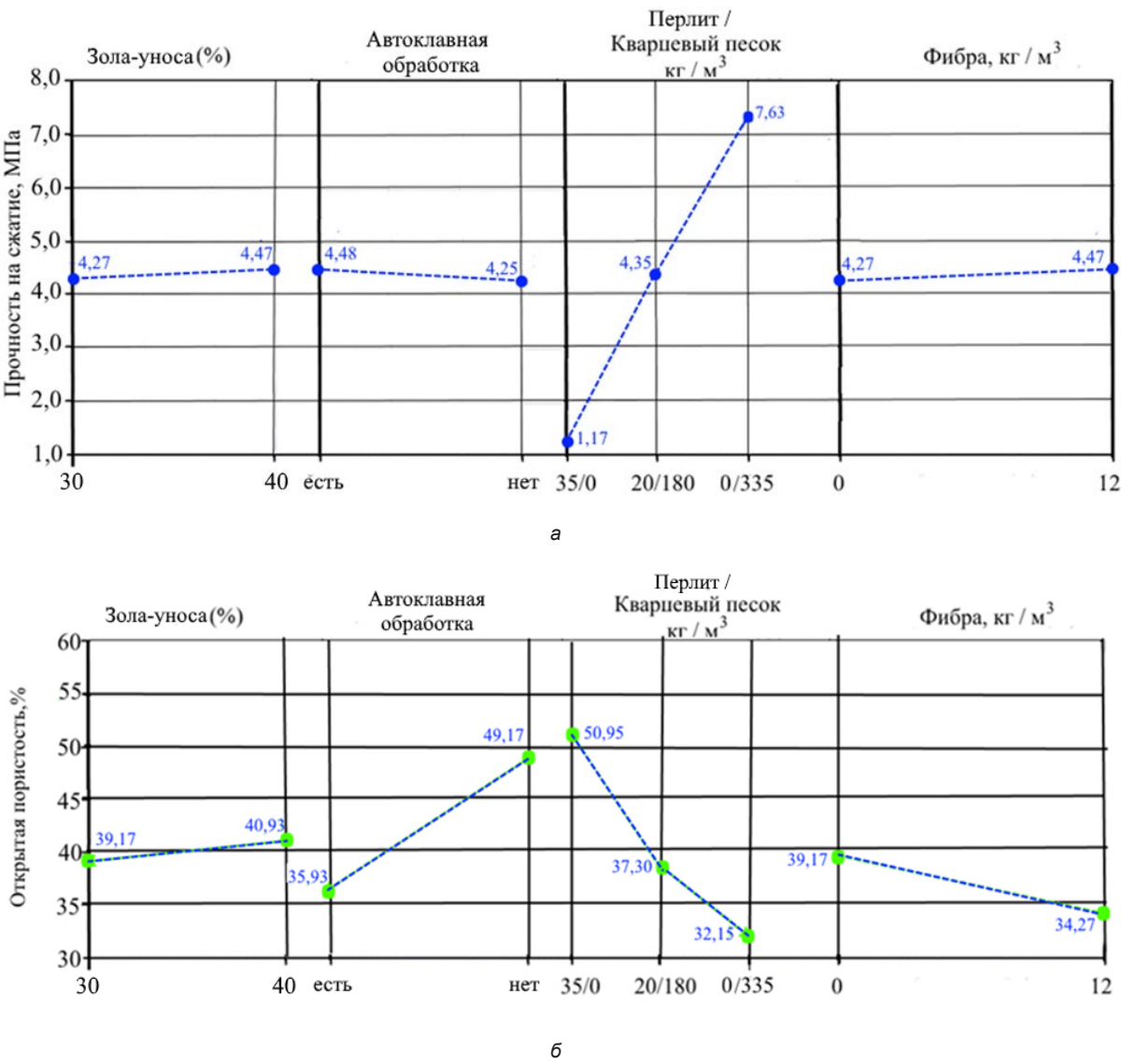


Рисунок 1 – Влияние компонентов на прочность на сжатие (а) и характеристики пористости (б)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Dynamics of development of compressive strength (a) and open porosity (b), based on the influence of composition parameters
Source: compiled by the authors.

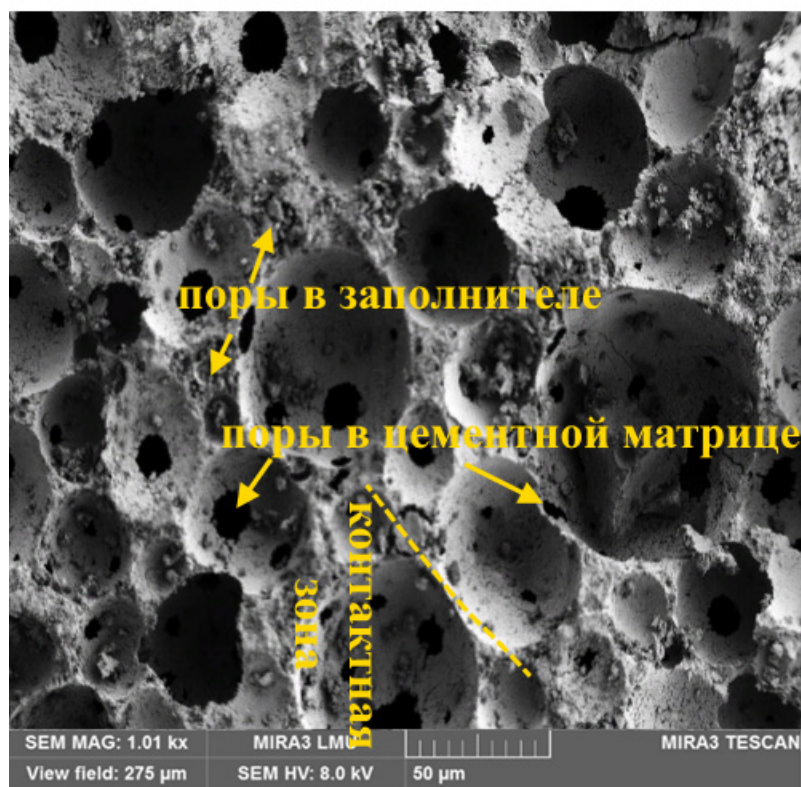


Рисунок 2 – Микроструктура новообразований в газобетонах (28 сут)
Источник: составлено автором

Figure 2 – Microstructure of new growths in aerated concrete (28 days)
Source: compiled by the authors.

Упрочнение цементного композита подтверждается результатами дифференциально-термического анализа образца газобетона (рис. 3).

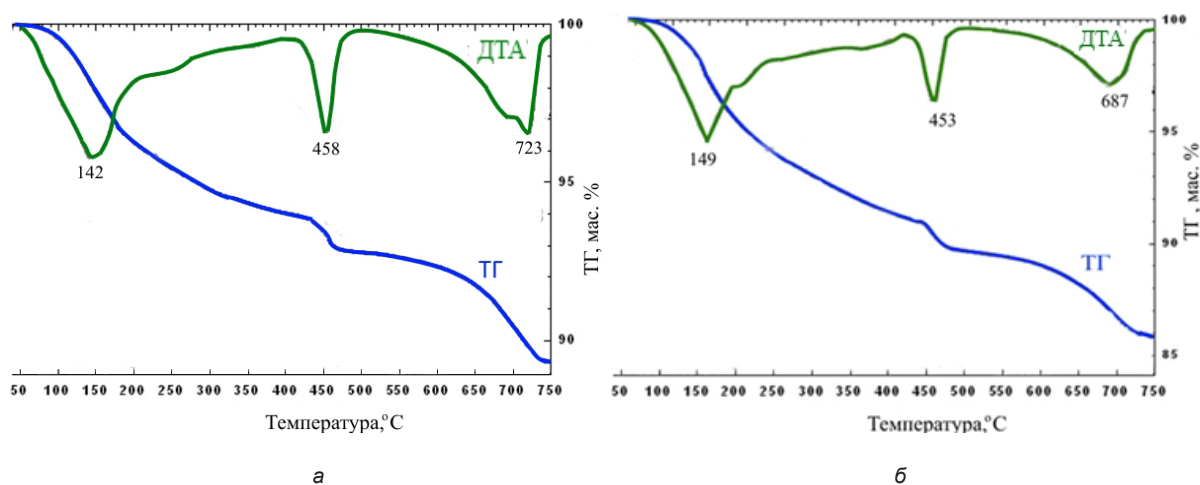


Рисунок 3 – ДТА и ТГ для газобетона в возрасте 3 (а) и 28 (б) сут
Источник: составлено автором.

Figure 3 – DTA and TG results for aerated concrete sample on days 3 (a) and 28 (b)
Source: compiled by the authors.

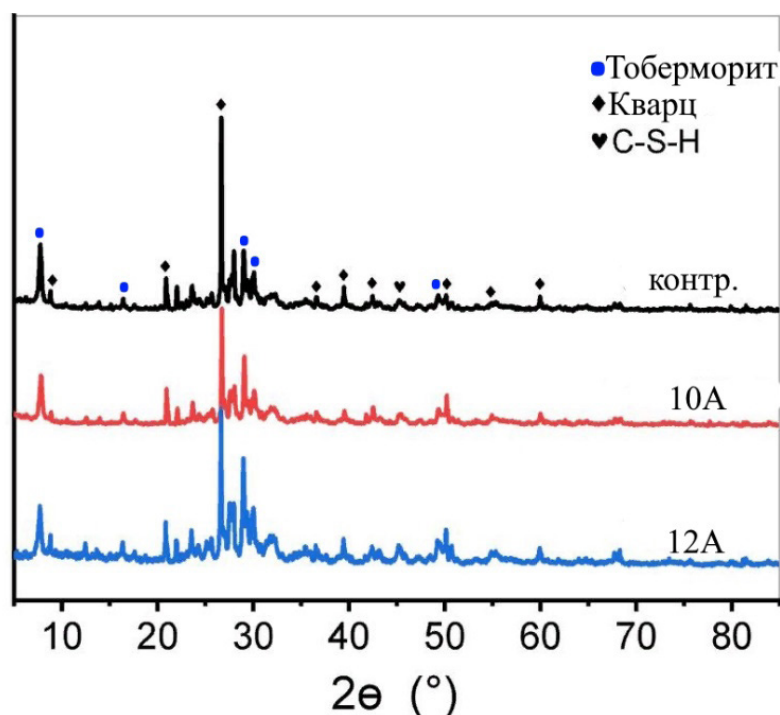


Рисунок 4 – Результаты РФА автоклавных и неавтоклавных образцов
Источник: составлено автором.

Figure 4 – RFA results for autoclaved and non-autoclaved samples
Source: compiled by the authors.

Из представленного описания можно сделать следующие выводы:

- При исследовании 28-суточного образца ячеистого бетона также наблюдается потеря воды на всех этапах с наибольшей интенсивностью при температурах от 70 до 190°C. После 200°C тоже происходит снижение количества удаленной воды.

- Наблюдается слабый эндотермический пик при температурах 320–410°C, который связан с дегидратацией слабо кристаллизованного бемита $\text{AlO}(\text{OH})$ или других продуктов декомпозиции гидратов, таких как $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

- Несмотря на увеличенную пористость (выше 86%) осуществляется управляемое структурообразование жесткой матрицы, что ведет к упрочнению композита.

Эти результаты указывают на возможность улучшения механических свойств ячеистых бетонов даже при высокой пористости, путем контролируемого формирования структуры матрицы.

Рентгенограммы (рисунок 4) подтверждают следующие факты:

- Наличие диффузной полосы в спектре исходных материалов в диапазоне 22–38° свидетельствует о присутствии алюмосиликатных частиц с стеклообразной природой.

- Появление полосы в диапазоне 17–38° указывает на образование гелей C-S-H (гидратов кальция-кремниевых гидросиликатов).

- Наблюдаемое исчезновение алита и гипса, а также появление гелей C-S-H, связано с реакцией гидратации клинкерных минералов в присутствии золы-уноса.

Эти результаты свидетельствуют о процессе гидратации и образования структуры композита с участием гелей C-S-H, что подтверждает управляемое структурообразование жесткой матрицы и упрочнение ячеистого бетона.

Проведенный комплекс исследований позволил выявить оптимальный состав ячеистого бетона, который образует структуру с открытой пористостью выше 40%. Это значительно способствует увеличению звукопоглощения материала. Благодаря такой структуре ячеистый бетон может эффективно поглощать звуковые волны и снижать уровень шума в помещениях, где он используется.

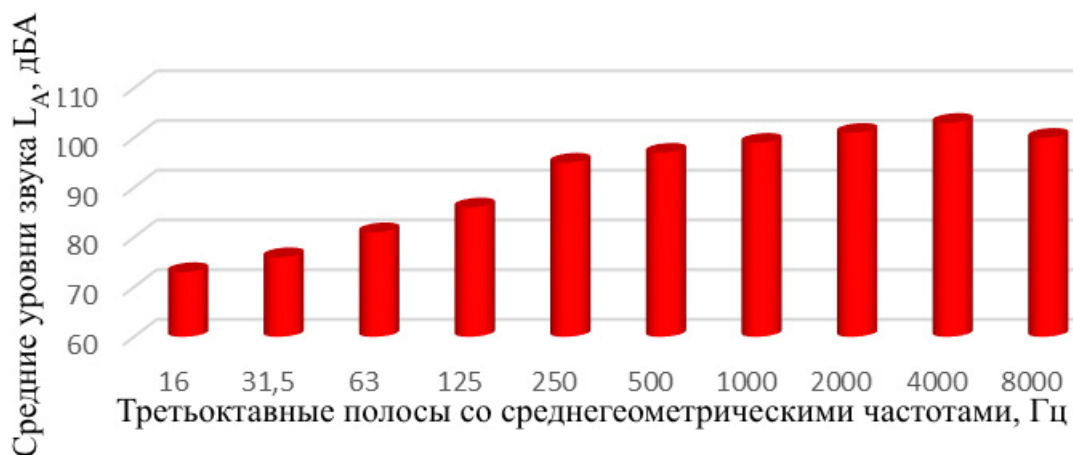


Рисунок 5 – Влияние звуковых частот на средние уровни звука в камере без звукопоглощающего образца L_A
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Impact of average sound levels on frequencies in the chamber without sound-absorbing sample L_A
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Влияние звуковых частот на средние уровни звука в камере со звукопоглощающим образцом $L_{3и}$
Источник: составлено автором.

Table 3
Impact of average sound levels on frequencies in a chamber with a sound-absorbing sample $L_{3и}$
Source: compiled by the authors.

Состав	$L_{3и}$, дБА, в третьооктавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1Н	71	76	75	75	71	24	45	35	31	35
2А	71	73	75	75	75	28	79	39	35	39
3Н	71	72	74	72	68	21	42	32	38	32
4А	71	73	75	73	69	22	43	33	29	33
контр.	71	72	73	71	67	40	61	53	53	53
5Н	66	66	68	70	66	40	62	52	54	52
6А	64	65	66	68	64	36	57	46	47	46
7Н	65	65	67	69	65	36	58	48	49	48
8А	64	64	66	67	63	54	66	56	64	56
9Н	63	63	66	66	62	53	65	55	57	55
10А	62	62	64	64	60	51	63	53	62	53
11Н	63	63	65	65	61	52	64	54	61	54
12А	71	72	73	71	67	40	59	51	51	50

ЗВУКОЗАЩИТНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОБЕТОНОВ

Измерения средних уровней звука в камере БЖ-2М позволили получить их зависимости от среднегеометрических частот. Эти данные представлены на рисунке 5 и в таблице 3.

На основе данных, представленных на рисунке 5 и в таблице 4, были рассчитаны коэффициенты звукопоглощения α в третьооктавных полосах со среднегеометрическими частотами 16–8000 Гц. Результаты этих расчетов отображены на рисунке 6.

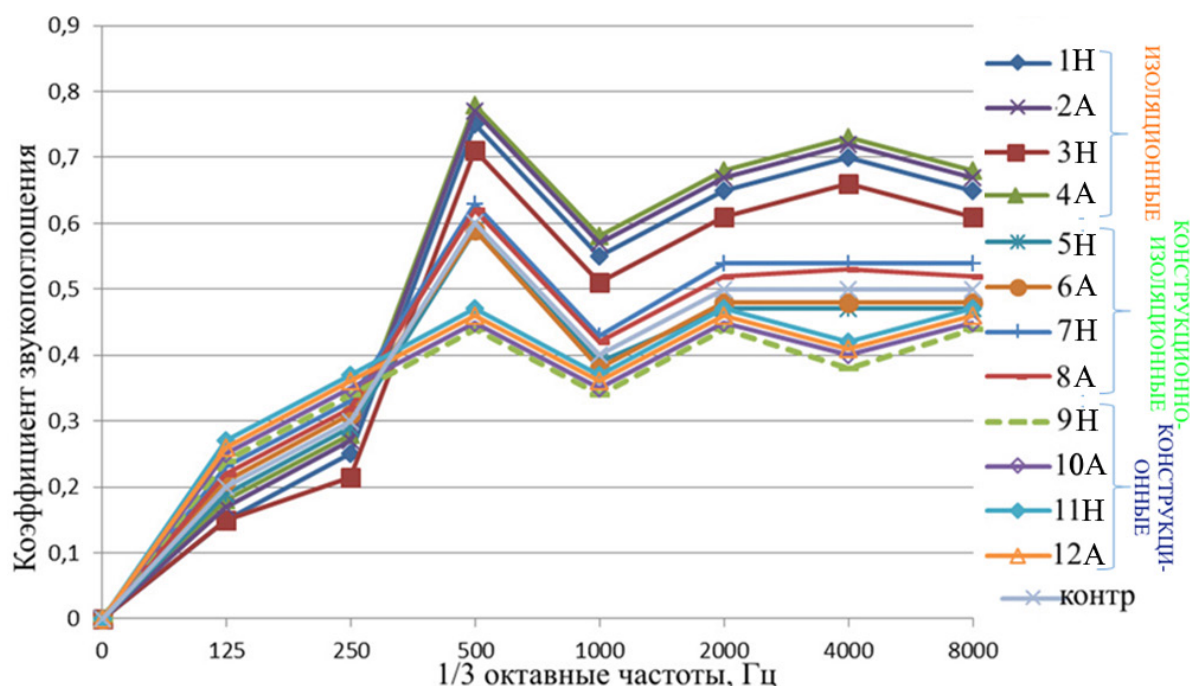


Рисунок 6 – Зависимость коэффициентов звукопоглощения разработанных составов от частот
Источник: составлено автором.

Figure6 – Dependence of sound absorption coefficients on frequencies
Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 показаны графики коэффициентов звукопоглощения α в третьоктавных полосах с различными среднегеометрическими частотами от 16 до 8000 Гц. Графики позволяют оценить эффективность звукопоглощающего материала в разных частотных диапазонах. Эти данные могут быть использованы для выбора и оценки эффективности звукопоглощающего материала в конкретных условиях и для принятия решений по звукоизоляции и созданию комфортных акустических условий в помещении.

Коэффициент снижения уровня шума (NRC) и средний коэффициент звукопоглощения (SAA) — это усредненные показатели, которые используются для одночисловой оценки звукопоглощающих свойств материалов. Они позволяют сравнить различные материалы и определить их эффективность в поглощении звука.

NRC выражается в процентах и представляет собой среднюю величину звукопоглощения для частот диапазона 250 Гц, 500 Гц, 1000

Гц и 2000 Гц. Чем выше значение NRC, тем лучше материал поглощает звук.

SAA также выражается в процентах и представляет собой среднюю величину звукопоглощения для частот диапазона 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц, 1000 Гц и 2000 Гц. SAA обычно используется для оценки звукопоглощающих свойств материалов с различной плотностью и толщиной.

Выбор между NRC и SAA зависит от требований и стандартов, принятых в вашей стране или отрасли. Рекомендуется обратиться к соответствующим нормам и стандартам для получения более подробной информации о том, как правильно оценивать и сравнивать звукопоглощающие свойства материалов (рисунок 7).

Действительно, звукопоглощающие характеристики материалов могут быть значительно улучшены путем снижения их плотности и увеличения открытой пористости. Это связано с тем, что звуковые волны имеют тенденцию проникать в поры материала и поглощаться внутри них.

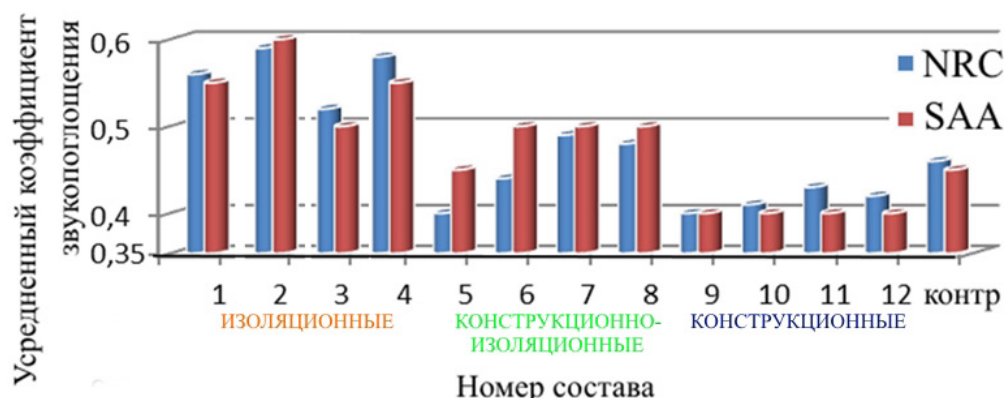


Рисунок 7 – Одночисловые характеристики акустического поглощения разработанных композитов
Источник: составлено автором.

Figure7 – One-number acoustic absorption characteristics of the developed composites
Source: compiled by the authors.

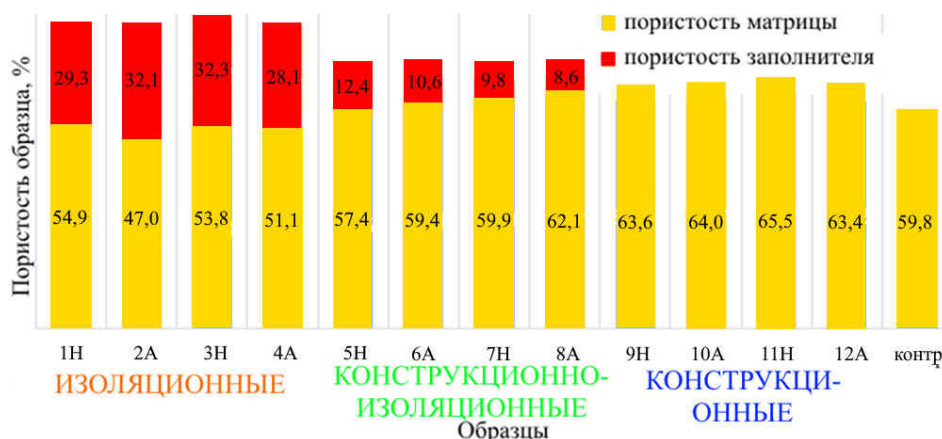


Рисунок 8 – Пористость разработанных образцов
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Porosity of the developed samples
Source: compiled by the authors.

Структура пор материала играет важную роль в его звукопоглощающих свойствах. Более открытая и связанная структура пор способствует лучшему поглощению звука. При наличии открытых пор звуковые волны могут проникать в них, где они и поглощаются, в то время как плотный материал может отражать звуковые волны обратно в окружающую среду.

Разработка бетонов с оптимальной структурой пор позволяет достичь высоких звукопоглощающих характеристик. Это может быть достигнуто путем использования специальных добавок или изменения состава бетона, чтобы создать более открытые и связанные поры.

Однако следует отметить, что звукопоглощающие свойства материалов также зависят от других факторов, таких как толщина и площадь поверхности материала, акустическая

среда и частота звука. Поэтому при разработке звукопоглощающих материалов необходимо учитывать все эти факторы для достижения оптимальных результатов. Повышение эффективности звукопоглощения достигается в результате управления образованием комплексной пористости на макро- и микроуровне за счет применения в составе композита порообразователя и пористого заполнителя соответственно (рисунок 8).

Исследование инфразвуковых и низких частот для оценки звукопоглощающих характеристик является важным дополнением к исследованию на более высоких частотах. Эти низкие частоты могут иметь особую значимость, например, для звукопоглощения в помещениях, где присутствует низкочастотный шум от технического оборудования или машин.

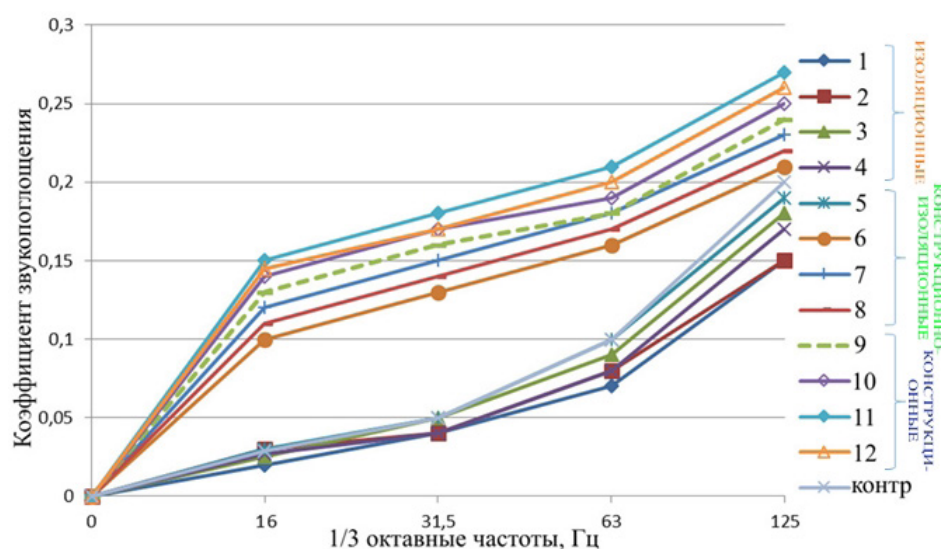


Рисунок 9 – Эффективность звукопоглощения газобетонов в низкочастотном диапазоне
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Efficiency of sound absorption of aerated concrete in the low-frequency range
Source: compiled by the authors.

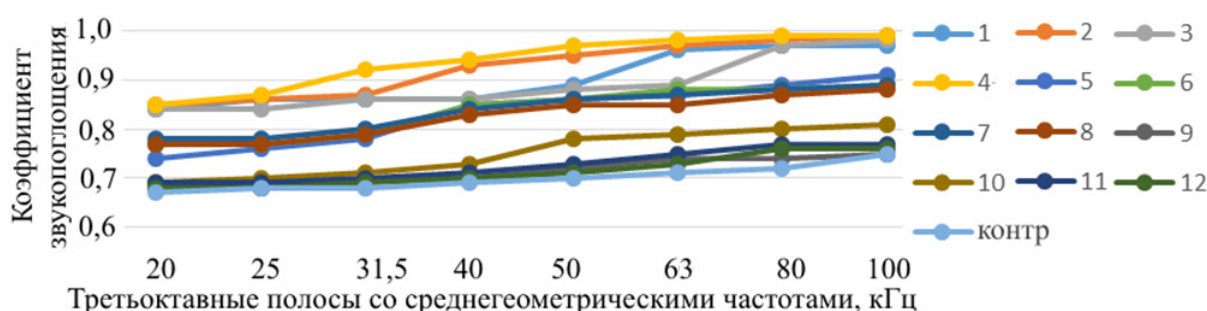


Рисунок 10 – Эффективность звукопоглощения газобетонов в высокочастотном диапазоне
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Efficiency of sound absorption coefficients of the concretes on ultra sound frequencies
Source: compiled by the authors.

Для проведения исследования использовались методы измерения с помощью измерителя шума и вибрации ВШВ 003 МЗ, а также программы InfraSound. Эти методы позволяют оценить звукопоглощающие характеристики материалов на низких частотах и инфразвуке.

Результаты исследования, представленные на рисунке 9, позволяют оценить эффективность материалов в поглощении звука на низких частотах. Они могут использоваться для определения эффективности материалов в снижении низкочастотного шума и создания комфортной акустической среды.

Важно отметить, что звукопоглощающие характеристики материалов на низких частотах могут отличаться от их характеристик на

более высоких частотах. Поэтому проведение исследования на различных частотах позволяет получить более полную картину о звукопоглощающих свойствах материалов в различных частотных диапазонах.

На рисунке 10 показаны результаты исследования скорости прохождения ультразвука и звукового давления с использованием прибора «Пульсар-1.1» и программы UltraSound Detector. Отмечается, что с повышением плотности образцов коэффициент звукопоглощения увеличивается до 4–5 раз по сравнению с контрольным образцом и малоплотными образцами разработанных автоклавных и неавтоклавных газобетонов в области низких частот.

Таблица 4
Коэффициенты а и b для предлагаемой расчетной формулы (2)
Источник: составлено автором.

Table 4
Coefficients a and b for the proposed calculation formula
Source: compiled by the authors.

Открытая пористость, %	Вид заполнителя*		
	пористый	пористый+плотный	плотный
20–30	2,14/1,62	1,84/2,14	1,55/0,42
30–40	0,50/1,94	0,16/1,85	1,64/0,22
40–50	1,14/1,57	0,19/1,86	0,16/0,35
50–60	1,49/1,55	0,22/1,58	1,14/2,11

*в числителе – а, в знаменателе – b.

В результате корректировки эмпирической зависимости вычисления параметра α с учетом полученных данных, предложены поправочные коэффициенты а и b (таблица 4); тогда формула (1) имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4aR/\rho_0 c_0}{(1 + 4aR/\rho_0 c_0)^2 + (2bM/\rho_0 c_0)^2} \quad (2)$$

Разработанные автоклавные и неавтоклавные газобетоны обладают высокими звукопоглощающими характеристиками, а именно – коэффициенты звукопоглощения составляют от 0,71 до 0,78, что на четверть выше контрольного состава и до 40% выше, чем у конструкционных газобетонных композитов большей плотности. Это означает, что данные бетоны эффективно поглощают звук и могут использоваться для создания звукоизоляционных конструкций или защиты от шума. Кроме того, эти бетоны обладают высокими эксплуатационными характеристиками, такими как низкий коэффициент теплопроводности (в диапазоне от 0,13 до 0,175 Вт / (м • К)) и марка по морозостойкости, соответствующая от 75 до 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что делает их подходящими для использования в строительстве.

Разработана широкая номенклатура звукопоглощающих материалов, включая автоклавные и неавтоклавные ячеистые бетоны, с целью обеспечения защиты среды обитания человека от воздействия шума. Нормативно-техническая документация на производство этих материалов была подготовлена и утверждена для их внедрения. Экспериментальное одноэтажное здание, построенное из газобетонных блоков разработанных составов успешно прошло испытания на комплекс за-

щитных характеристик, что подтвердило перспективность этих материалов. Данное здание также является объектом исследований при разработке новых систем защиты от акустического воздействия. Реализация результатов и использование этих материалов позволит создать безопасную среду обитания для людей, что особенно актуально в условиях роста природных и техногенных аномальных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологическое решение, обеспечивающее получение автоклавных и неавтоклавных газобетонов с улучшенными характеристиками звукопоглощения, было обосновано и экспериментально подтверждено. Достигнуто это за счет использования композиционного вяжущего, содержащего золу-уноса, и вспученного перлита. Установлено, что ячеистые бетоны на таких композиционных вяжущих являются эффективными материалами для звукопоглощения акустических волн различных спектров. Была выявлена взаимосвязь между компонентами композиционного вяжущего, соотношением пористого и плотного заполнителей и процессами структурообразования, что позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики материалов.

Были установлены закономерности синтеза газобетонов и механизм влияния состава бетонной смеси на микроструктуру композита. Оптимизация процессов структурообразования с использованием композиционного цементно-золяного вяжущего, пористого заполнителя и порообразователя позволила достичь желаемой открытой пористости, прочности на сжатие и других характеристик материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Harding J. L., Preston L. A., Hafla E. Modeling the acoustic noise from a wave energy converter farm

and its impact on marine mammals at the PacWave South site, offshore Newport Oregon. *Renewable Energy*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.014>

2. Savin A., Ermakov V., Egorov M. Acoustic impact on bridges. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63, Pp. 618-627

3. Kim J., Lee S., Kim S., Song H., Ryu J. Quantitative study on the influence of non-acoustic factors on annoyance due to floor impact noise in apartments. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 202, 109144.

4. Seyyednourani M., Akgun S., Ulus Y., Yildiz M., Sas H.S. Experimental investigation on Compression-After-Impact (CAI) response of aerospace grade thermoset composites under low-temperature conditions assisted with acoustic emission monitoring. *Composite Structures*. 2023. Vol. 321, 117260

5. Zhong S., Punpongsanon P., Iwai D., Sato K. Estimation of fused-filament-fabrication structural vibro-acoustic performance by modal impact sound. *Computers & Graphics*. 2023. Vol. 115, Pp. 137-147.

6. Lyu Q., Dai P., Chen A. Sandwich-structured porous concrete manufactured by mortar-extrusion and aggregate-bed 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 392, 131909.

7. Veloso M., Pereira M., Godinho L., Amado-Mendes P., Redondo J. Insertion loss prediction of sonic crystal noise barriers covered by porous concrete using the Method of Fundamental Solutions. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 211, 109543.

8. Niyomukiza J. B., Eisazadeh A., Tangtermsirikul S. Recent advances in slope stabilization using porous vegetation concrete in landslide-prone regions: A review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76, 107129.

9. Bagaria A., Juneja D. Experimental research on influence of marble powder, silica fume and polypropylene fiber on the porous concrete. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.240>

10. Pal R., Sarkar P.P. Developing a model of porous concrete-filled rigid pavement. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.333>

11. Jin X., Haider M. Z., Cui Y., Jang J. G., Kim Y. J., Fang G., Hu J. W. Development of nanomodified self-healing mortar and a U-Net model based on semantic segmentation for crack detection and evaluation. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 365, 129985.

12. Haider M. Z., Jin X., Hu J. W. Development of nanomodified-cementitious composite using phase change material for energy saving applications. *Applied Energy*. 2023. Vol. 340, 121067

13. Sldozian R. J., Tkachev A. G., Burakova I. V., Mikhaleva Z. A. Improve the mechanical properties of lightweight foamed concrete by using nanomodified sand. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 34, 101923.

14. Moroni F., Palazzetti R., Zucchelli A., Pirondi A. A numerical investigation on the interlaminar strength of nanomodified composite interfaces. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 55, Pp. 635-641.

15. Konsta-Gdoutos M. S., Batis G., Danoglidis P. A., Zacharopoulou A. K., Zacharopoulou E. K.,

Falara M. G., Shah S.P. Effect of CNT and CNF loading and count on the corrosion resistance, conductivity and mechanical properties of nanomodified OPC mortars. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 147, Pp. 48-57.

16. Pan Q., Hu J., Hu C., Yan Y. Repairation and characterization of carbon nanotubes coated on expanded perlite as sound absorption composite materials. *Materials Science and Engineering: B*. 2023. Vol. 296, 116697.

17. Zhang L., Zhang W., Xin F. Broadband low-frequency sound absorption of honeycomb sandwich panels with rough embedded necks. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 196, 110311.

18. Shi K., Hu D., Li D., Jin G. Sound absorption behaviors of composite functionally graded acoustic structure under hydrostatic pressure. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 211, 109474.

19. Cai L., Tian J., Feng K., Liu Y., Jiang Q. Sound absorption model of foam glass-ceramics based on microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. Vol. 604, 122136.

20. Zhu J., Gao H., Dai S., Qu Y., Meng G. Multilayer structures for high-intensity sound energy absorption in low-frequency range. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 247, 108197.

21. Sun D., Yin F., Deng Y., Liu K., Tang J., Shen C., Sun Y., Wang A., Huang N., Hu C. Utilization of carbide slag in autoclaved aerated concrete (CS-AAC) and optimization: foaming, hydration process, and physic-mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*. 2023, e02354

22. Gu X., Wang S., Liu J., Wang H., Xu X., Wang Q., Zhu Z. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) as foam stabilizer on the workability and pore structure of iron tailings sand autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 376, 130979

23. Khunt Y., Nathwani V., Patel H., Joshi T., Gandhi D. Investigation on properties of autoclave aerated concrete using different pre-curing and curing techniques. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.047>

24. Bukhari S. A., Patil D., Gogate N. G., Minde P. R. Utilization of waste materials in non-autoclaved aerated concrete blocks: State of art review. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.334>

25. Poongodi K., Murthi P. Effects of using autoclaved aerated concrete block debris as lightweight aggregate on internal curing of concrete. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.180>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сяо Вэньсюй – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Xiao Wenxu. Postgraduate student of the Building Materials Science, Products and Structures Department.