DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18

*Федюк Р.С. *, кандидат технических наук, доцент,
Баранов А.В.,
Дальневосточный федеральный университет, Россия,
Мугахед Амран Й.Х., PhD,
Университет принца Саттама Бин Абдулазиза, Саудовская Аравия*
*Ответственный автор E-mail: roman44@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЕ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Аннотация: разработаны составы газо- и пенобетонов с улучшенными акустическими характеристиками. Выявлен оптимальный вид пористости, способствующей поглощению звуковых волн, как в диапазоне слышимых частот, так и при инфразвуковых и ультразвуковых частотах. Усовершенствована математическая модель проектирования звукопоглощающих бетонов, учитывающая, как пористость композита, так и влияние пористого заполнителя. Установлены закономерности синтеза газобетонов и пенобетонов, заключающиеся в оптимизации процессов структурообразования за счет применения полиминерального цементно-золевого вяжущего и порообразователя. Состав композита интенсифицирует процесс гидратации системы, что приводит к синтезу полиминеральной гетеродисперсной матрицы с открытой пористостью выше 60%. Выявлены особенности влияния системы «Портландцемент – алюмосиликат – комплекс модификаторов» на реологию бетонной смеси, что позволяет значительно уменьшить напряжение сдвига и создать легкоформуемые ячеистобетонные смеси. Повышенная активность и гранулометрия алюмосиликатов определяют рост числа контактов и механическое сцепление между частицами при уплотнении, упрочняя каркас межпоровых перегородок. Установлен механизм влияния состава бетонной смеси на микроструктуру композита. Наличие в системе наряду с цементом очищенных алюмосиликатов и комплекса добавок способствуют синтезу матрицы с открытой пористостью, за счет чего возрастает коэффициент звукопоглощения.

Ключевые слова: ячеистый бетон, пористый заполнитель, золошлаковая смесь, звукопоглощение, структура, прочность

Введение

Всесторонний теоретический обзор [1-9] выявил, что на современных городских жителей действует целый комплекс акустических воздействий различных спектров (слышимого, инфразвукового и ультразвукового). Кроме того, действующие и перспективные образцы акустического нелетального оружия, разработанного для органов охраны правопорядка, заставляют искать строительные средства защиты населения от них [10-12].

Исходя из этого, актуальным является проектирование композитов с заданной пористой структурой, способных эффективно поглощать акустическую энергию различных диапазонов. Известно, что разработка цементных материалов, обладающих необходимой прочностью и высокой открытой пористостью, возможна только в результате контролируемого формирования макро-, микро- и наноструктуры [13-18]. При этом, обеспечение акустического комфорта населения должно проводиться в увязке с заботой о сохранении окружающей среды, что решается путем минимизации потребления цемента с одновременной утилизацией промышленных отходов [19-22].

Важнейшая структурная особенность звукопоглощающих материалов – открытые поры, в которых звуковая энергия преобразуется в тепловую. Механизм звукопоглощения отличается от эффективной теплоизоляции, для которой характерно наличие закрытой пористости. Однако, материалы с открытой пористостью обладают высокими водопоглощением и морозостойкостью, соответственно, низкой долговечностью [23-25]. Соответственно, необходимо создание высокопористых конструкционных материалов с одновременным обеспечением нормативной прочности и долговечности.

Таковыми материалами могут быть ячеистые бетоны, которые, при значительной экономии цемента, способны служить материалом для несущих и ограждающих тепло- и звукоизоляционных конструкций. Особо перспективно при этом создание малоэнергоемких неавтоклавных газо- и пенобетонов.

Исходя из вышеизложенного, в исследовании обозначена рабочая гипотеза о возможности разработки неавтоклавных звукопоглощающих ячеистых бетонов в результате контролируемого формирования макро-, микро- и наноструктуры за счет использования полиминеральных систем и получения открытой пористости выше 60%.

Методы и материалы

Для управления структурообразованием цементного композита необходимо применение нового сырья. Принимая во внимание, что в России накоплены огромные отвалы гидроудаленных золошлаковых смесей (ЗШС), в работе была разработана технология их четырехступенчатой очистки с последующим получением алюмосиликатной добавки (АД) В качестве вяжущего применялся Спасский портландцемент ЦЕМ I 42,5Н.

Для создания изоляционных и конструкционно-изоляционных материалов применялся вспученный вермикулит Кокшаровского месторождения (Приморский край) фракцией 1,25 мм. Для создания конструкционных и изоляционно-конструкционных ячеистых бетонов применялся песок Раздольненского месторождения (Приморский край) фракцией 1,25 мм.

Для создания конструкционных и изоляционно-конструкционных ячеистых бетонов применялся песок Раздольненского месторождения (Приморский край) фракцией 1,25 мм. Для снижения водопотребности бетонной смеси при сохранении ее требуемой подвижности использован порошковый суперпластификатор Pantarhit PC 160 (Ha-Be Betonchemie, Германия).

Для снижения усадочных деформаций ячеистых бетонов применялась полипропиленовая фибра производства ООО «Юниверсум-ДВ» (Приморский край).

Технические характеристики пенообразователя и газообразователя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики пенообразователей

Table 1

Technical characteristics of the blowing agents

Порообразователь	Основа	Внешний вид	Плотность, г/см ³	pH
Пенообразователь «Эталон» (Челябинская обл.)	Протеиновый	Темно-коричневая жидкость	1,14±0,1	7,0
Пудра алюминиевая ПАП-1 (Новосибирская обл.)	Алюминий	Порошок серебряного цвета	0,15-0,30	-

Для регулирования сроков схватывания газобетонной массы вводили двухводный гипс, полученный помолотом гипсового камня. Для снижения водопоглощения бетона применялся гидрофобизатор АМСР-3 («Силан», Липецкая обл.).

Для планирования экспериментов и определении порядка рандомизации использовалось статистическое программное обеспечение «Design-Expert version 10» (Stat-Ease, Inc.) с использованием методологии Тагучи (табл. 2).

Таблица 2

Вариационные уровни для переменных

Table 2

Variational levels for variables

Переменные	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
ЗШС, %	40	50	-
Вид бетона	ГБ	ПБ	-
Соотношение заполнителей (вермикулит/кварцевый песок), кг	35 / 0	20 / 180	0 / 335
Наличие фибры, кг/м ³	0	12	-

Гранулометрический состав порошкообразных веществ проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц «Analysette 22» (Германия). Определение удельной поверхности сырьевых материалов проводилось на приборе РСХ-11. Изучение микроструктуры сырьевых материалов и синтезированных композитов осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3. Изучение качественного и количественного состава и свойств исходных материалов, композиционного вяжущего и бетонных образцов было проведено на рентгенофлуоресцентном спектрометре со встроенным дифрактометром ARL 9900 WORKSTATION (Thermo Fisher Scientific). Дифференциально-термический анализ (ДТА) и термогравиметрия (ТГ) осуществлялись с помощью термогравиметрического анализатора Shimadzu DTG-60H. Вязкость смесей определялась на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1. Предел прочности при сжатии измеряли на кубических образцах размером 100 × 100 × 100 мм. Усадка образцов определялась по ГОСТ 24544-81 на призматических образцах размером 40×40×160 мм с помощью устройства УБ-40. Пори-

стость и водопоглощение синтезированных композитов исследовалась на образцах размерами $70 \times 70 \times 70$ мм в возрасте 28 сут.

Акустические характеристики исследовались на образцах размером $200 \times 200 \times 30$ мм на лабораторной установке БЖ2М. Источником шума служил функциональный генератор сигналов ФГ-100 с диапазоном генерируемых частот от 0,1 Гц до 100 кГц. Измерения осуществлялись с помощью измерителя шума и вибрации ВШВ 003 МЗ с диапазоном частот измерения звукового давления (октавных полос) от 2 до 8000 Гц. Исследование скорости прохождения ультразвука через ячеистобетонные образцы было проведено исследование с помощью измерителя времени распространения ультразвука «ПУЛЬСАР-1.1».

Результаты и обсуждения

Упрощенной, но адекватной моделью пористой среды, применяемой в работе, является модель многослойной перфорированной панели с воздушными прослойками между слоями, предложенная Д. Маа (рис. 1). Данная модель была принята для моделирования звукопоглощения разработанного бетона из-за ее простоты; воздушные полости предполагаются однородной формы с одинаковым диаметром d .

Рис. 1. Модель многослойной перфорированной панели: а) схематическое представление ячеистого бетона в виде панели, б) упрощенное представление бетонной матрицы, в) упрощенное представление эффективного диаметра пор, г) приведенная пористость панели

Fig. 1. Model of a multilayer perforated panel: a) a schematic representation of cellular concrete in the form of a panel, б) a simplified representation of a concrete matrix, в) a simplified representation of the effective pore diameter, г) reduced porosity of the panel

На основании принятой модели с помощью электроакустической аналогии сопротивлений может быть вычислен коэффициент звукопоглощения α :

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

Теоретическая модель четко указывает на то, что коэффициент акустического поглощения зависит от различных параметров, таких как радиус межпоровых промежутков, толщина перфорированной панели, параметр формы заполнителей и целевая открытая пористость. В то же время, данная модель не учитывает влияние пористого заполнителя, введенного в состав бетона для поглощения инфразвуковых и ультразвуковых волн, на коэффициент α . Поэтому в работе одной из задач стоит усовершенствовать математическую модель звукопоглощения ячеистых бетонов с учетом пористого заполнителя на основе полученных экспериментальных результатов.

В табл. 3 приведены разработанные составы ячеистых бетонов.

Таблица 3

Разработанные составы ячеистых бетонов

Table 3

Developed compositions of cellular concrete

Компоненты, кг/м ³	Номер состава												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	контр.
Портландцемент	150	105	125	85	192	130	160	110	240	170	200	140	225
Известь	-	45	-	40	-	62	-	50	-	70	-	60	100
ЗПС	100	100	125	125	128	128	160	160	160	160	200	200	-
Вода	100	100	112,5	112,5	128	128	144	144	150	150	180	180	182
Пенообразователь «Эталон»	0,8	-	0,8	-	1	-	1	-	1,2	-	1,2	-	-
Алюминиевый порошок	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	0,5
Двуводный гипс	-	2,5	-	2,1	-	3,2	-	2,7	-	4	-	3,5	4
Хлористый кальций	-	1,5	-	1,3	-	2	-	1,7	-	2,5	-	2,2	3,5
Суперпластификатор Pantarhit PC 160	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	-
Гидрофобизатор АМСР-3	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 вермикулит	35	35	35	35	20	20	20	20	-	-	-	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	180	180	180	180	335	335	335	335	205
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

Несмотря на то, что все смеси были запроектированы из условий равноподвижности, дополнительно были получены реограммы на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1, которые показали, что все разработанные смеси имеют характеристики, позволяющие удовлетворительно осуществлять технологию транспортирования готовой смеси к месту формирования.

В табл. 4 показана взаимосвязь между прочностью на сжатие и общей пористостью для всех исследуемых разработанных составов согласно табл. 3 (13 составов по 6 образцов каждый), где наблюдается обратное соотношение между прочностью и общей пористостью ячеистого бетона. Следует отметить, что газобетонные образцы показывают самую высокую открытую пористость и одновременно относительно низкую прочность на сжатие. Другими словами, даже несмотря на то, что алюминиевый порошок эффективнее с точки зрения создания пустот, включая открытую пористость, по сравнению с пенообразователем, прочность на сжатие несколько ниже, чем у образцов с пенообразователем. Добавление полипропиленовой фибры в бетон является эффективным средством повышения прочностных характеристик с незначительным влиянием на пористость. Кроме того, хотя замена вермикулита на кварцевый песок увеличивает прочность на сжатие, открытая пористость при этом снижается из-за улучшенной упаковки частиц, что, очевидно, будет отрицательно сказываться на звукопоглощающих характеристиках.

Таблица 4

Плотность, прочность и пористость ячеистых бетонов (28 суток)

Table 4

Density, strength and porosity of cellular concrete (28 days)

Номер состава	Прочность на сжатие	Плотность, кг/м ³	Общая пористость, %	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %
1	1,1	315	85,1	40,0	45,1
2	1,1	322	85,2	61,9	23,2
3	1,5	331	87,0	39,8	47,2
4	1,0	329	85,0	62,1	22,9
5	4,0	584	69,8	30,1	39,7
6	4,3	592	70,0	42,3	27,7
7	4,9	602	69,7	26,0	43,7
8	4,0	601	70,7	50,8	19,9
9	7,6	815	63,6	23,9	39,7
10	7,5	826	63,9	36,8	27,1
11	7,8	836	65,4	25,8	39,6
12	7,6	834	63,3	41,1	22,2
контр.	2,1	591	72,7	41,9	30,8

Микроструктурный анализ разработанных пенобетонов показал, что пузырьки также встречаются в стенках пузырьков пены, как показано на рис. 2. Они имеют две различные формы, некоторые округлены, а другие – эллипсоидальные. Округленные пузырьки вызваны вовлеченным воздухом и, следовательно, не имеют поверхностных зарядов. Это означает, что они не подвержены влиянию пузырьков пены и, следовательно, более стабильны и вряд ли могут слипаться.

Рис. 2. Микроструктура новообразований в пенобетонах в возрасте 28 суток: чистый цементный камень (а) и цементный камень на разработанном композиционном вяжущем (б)

Fig. 2. The microstructure of new growths in foam concrete at the age of 28 days: pure cement stone (a) and cement stone on the developed composite binder (b)

Эллиптические пузырьки, очевидно, были получены из пены поверхностно-активного вещества суперпластификатора за счет локальных сил, вызывающих овальную форму. Кроме того, эти очень небольшие пузырьки могут потенциально быть источником больших изменений размера пузыря с использованием процесса, похожее на Оствальдовское созревание.

Упрочнение цементного композита подтверждается результатами дифференциально-термического анализа пенобетонного образца 3 в возрасте 3 и 28 суток (рис. 3).

Рис. 3. Результаты ДТА и ТГ для образца 3 в возрасте 3 (а) и 28 (б) суток
Fig. 3. The results of DTA and TG for specimen 3 at the age of 3 (a) and 28 (b) days

Как и для 3-суточного, для 28-суточного образца отмечается потеря воды на всех этапах с наибольшей интенсивностью при температурах 70-190°C. После 200°C также наблюдается снижение количества удаленной воды. Очевидно, что эндотермический пик, связанный с дегидратацией ниже 200°C связан с частичным удалением воды из этtringита и слабо кристаллизованных и аморфных фаз гидросиликатов кальция. Слабый эндотермический пик с потерей воды в интервале 320-410°C соответствует дегидратации слабо кристаллизованного бемита $\text{AlO}(\text{OH})$ или других продуктов декомпозиции этtringита, таких как $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ гидратов. Снижение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который является показателем пуццолановой реакции, показывает, что его образование в ходе гидратации CaO , приводит к его связыванию в гидросиликаты второй генерации.

Таким образом, применение разработанного композиционного вяжущего позволяет создать открытопористую структуру твердеющего композита. Соответственно, осуществляется управляемое структурообразование жесткой матрицы несмотря на увеличенную пористость, а это, в свою очередь, влечет за собой упрочнение композита. Исходя из этого, ячеистые бетоны на основе разработанного вяжущего способны быть достаточно прочными даже при значениях пористости выше 85%.

Это подтверждается рентгенограммами: сухой смеси исходных материалов, газобетонного образца в возрасте 1 суток после смешивания с теплой водой и образца в возрасте 28 суток (рис. 4). Диффузная полоса в спектре исходных материалов, в диапазоне $22-38^\circ$, была вызвана наличием алюмосиликатных частиц со стеклообразной природой. Как видно из спектра суточного образца дифракционные пики алита и гипса исчезли. Широкая полоса в диапазоне $17-38^\circ$ указывает на образование гелей C-S-H. Появление гелей C-S-H и исчезновение алита и гипса связано с реакцией гидратации клинкерных минералов в присутствии гипса и ЗШС.

Для оценки способности ячеистобетонного образца поглощать звуковые волны производилось измерение звукового давления в экспериментальной камере БЖ-2М с образцом-перегородкой и без него и вычиталась разница, по которой и можно было в дальнейшем охарактеризовать способность образца к звукопоглощению. Результаты измерения средних уровней звука в камере: без звукопоглощающего образца L_A и с образцом $L_{зи}$, дБА, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16-8000 Гц приведены, соответственно, на рис. 5 и в табл. 5.

Рис. 4. Результаты РФА газобетона состава 4: сухая смесь, а также через 1 и 28 суток твердения
Fig. 4. XRD results of aerated concrete composition 4: dry mixture, as well as after 1 and 28 days of hardening

Рис. 5. Результаты измерения средних уровней звука в камере без звукопоглощающего образца L_A
Fig. 5. The results of measuring average sound levels in a chamber without a sound-absorbing specimen L_A

Таблица 5

Результаты измерения средних уровней звука в камере со звукопоглощающим образцом $L_{зи}$

Table 5

Measurement results of average sound levels in a chamber with a sound-absorbing sample L_{SI}

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

По результатам данных, представленных на рис. 5 и в табл. 5, были рассчитаны коэффициенты звукопоглощения α в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 16-8000 Гц (рис. 6).

Рис. 6. Результаты коэффициентов звукопоглощения разработанных составов

Fig. 6. The results of sound absorption coefficients of the developed composites

Для одночисловой оценки коэффициента звукопоглощения современные зарубежные нормы рекомендуют использовать такие усредненные показатели, как коэффициент снижения уровня шума (noise reduction coefficient, NRC) или средний коэффициент звукопоглощения (sound absorption average, SAA). Полученные результаты вычисления этих показателей для разработанных составов приведены на рис. 7.

Рис. 7. Усредненные показатели звукопоглощения для разработанных ячеистых бетонов
Fig. 7. Average sound absorption indicators for developed cellular concretes

Анализируя рис. 7, приходим к следующим выводам:

1. Звукопоглощающие характеристики разработанных составов достаточно высоки. Прослеживается тенденция улучшения звукопоглощающих характеристик с уменьшением плотности и увеличением открытой пористости.

2. Сравнивая показатели NRC и SAA, рассчитанные по 12 и 4 частотам соответственно, видим их достаточно хорошую сходимость. Очевидно, что основными частотами, для которых и необходимо рассчитывать защиту от акустических волн слышимого спектра, являются частоты SAA (250, 500, 1000 и 2000 Гц).

С другой стороны, для достижения цели работы необходимо учесть звукопоглощение также и на частотах неслышимого спектра. Для этого предлагается ввести показатель ИСУ (инфразвук – слышимый спектр – ультразвук), который, помимо частот, учитываемых SAA, также будет учитывать частоты 7 Гц и 40000 Гц. Эти частоты выбраны на основании анализа литературы и собственных исследований и соответствуют двум критериям – наиболее часто применяются в современных образцах акустического оружия и наиболее опасны для человеческого организма.

Таким образом, разработанные низкоплотные составы имеют коэффициенты звукопоглощения, достигающие значений 0,71-0,78, что на 25% выше контрольного состава и до 40% выше конструкционных бетонов большей плотности.

Ввиду того, что по рис. 6 не видна тенденция коэффициента звукопоглощения в области низких частот, дополнительно было проведено исследование инфразвуковых и низких частот. Характеристики звукопоглощения были изучены на установке БЖ-2М двумя взаимодополняющими методами: с помощью измерителя шума и вибрации ВШВ 003 МЗ и с помощью программы InfraSound Detector, использующей микрофон смартфона (рис. 8).

Рис. 8. Результаты коэффициентов звукопоглощения разработанных составов на инфразвуковых и низких частотах

Fig. 8. Sound absorption coefficients of the developed compositions at infrasonic and low frequencies

Скорость прохождения ультразвуковых волн была исследована с помощью прибора «Пульсар-1.1». Для определения звукового давления была использована программа UltraSound Detector. Интерпретированные результаты приведены на рис. 9.

Рис. 9. Зависимость коэффициента звукопоглощения от ультразвуковых частот для различных составов

Fig. 9. Dependence of sound absorption coefficient on ultrasonic frequencies for various compositions

Полученные эмпирические результаты показали, что математическая модель коэффициента звукопоглощения (1) не может быть применима для всех спектров акустического воздействия (слышимый звук, ультразвук, инфразвук). Это связано, как с тем, что в данной модели не учтен вид пористости (открытая или закрытая), так и с тем, что не учтено влияние пористого заполнителя.

В то же время, как было выявлено ранее, именно наличие пористого заполнителя оказывает решающее действие на изменение коэффициента звукопоглощения бетона.

В ходе уточнения математической модели на основании полученных экспериментальных данных, были введены коэффициенты a и b (табл. 6), тогда формула коэффициента звукопоглощения принимает следующий вид.

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

Таблица 6

Коэффициенты a и b для предлагаемой математической модели

Table 6

Coefficients a and b for the proposed mathematical model

Открытая пористость, %	Вид заполнителя		
	пористый	пористый+плотный	плотный
20-30	1.25 / 0.73	0.95 / 1.06	0.66 / 1.46
30-40	1.61 / 0.56	1.05 / 0.96	0.75 / 1.33
40-50	2.05 / 0.46	1.25 / 0.92	1.05 / 1.26
50-60	2.38 / 0.33	1.33 / 0.46	2.05 / 1.00

Примечание: над чертой коэффициент a , под чертой – b

Выводы

Установлено, что ячеистые бетоны на композиционных вяжущих, являются эффективными материалом для звукопоглощения акустических волн, как слышимого, так и неслышимого спектров. Выявлена взаимосвязь между компонентами КВ, соотношением пористого и плотного мелкого заполнителя и процессами структурообразования, что позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики.

Установлены закономерности влияния рецептурных и технологических факторов на реологические характеристики бетонной смеси, а также на прочность и коэффициент звукопоглощения бетонов:

- выявлено, что использование предварительно очищенной от примесей золошлаковой смеси, замещающей портландцемент на 40-50%, а также вспученного вермикулита оптимизирует микроструктуру ячеистого композита при достижении открытой пористости выше 60%;

- разработана широкая номенклатура ячеистых бетонов на разработанном КВ, обеспечивающих заданные характеристики прочности и звукопоглощения. Оптимальные составы были запроектированы на основе определенных природных и техногенных ресурсов Приморского края, которые имеют высокую адгезию к цементной матрице, одновременно обеспечивая высокопористую структуру.

Уточнена математическая модели коэффициента звукопоглощения с учетом пористой структуры, как цементного камня, так и заполнителя.

Литература

1. Bhutta M.A.R, Tsuruta K., Mirza J. Evaluation of high-performance porous concrete properties // Construction and Building Materials. 2012. № 31. P. 67 – 73.
2. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 85 – 99.
3. Kim H., Hong J., Pyo S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete // Applied Acoustics. 2018. № 138. P. 171 – 178.
4. Федюк Р.С., Тимохин Р.А., Смоляков А.К. Научное лидерство китайских ученых в области строительных технологий // Россия и Китай: проблемы стратегического взаимодействия: сборник Восточного центра. 2017. № 19. С. 21 – 24.
5. Oancea I., Bujoreanu C., Budescu M., Benchea M., Gradinaru C.M. Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements // Journal of Cleaner Production. 2018. № 203. P. 301 – 312.
6. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation // Journal of Sound and Vibration. 2015. № 353. P. 378 – 394.
7. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5-5000 Hz. Building and Environment. 2019. № 156. P. 12 – 20.
8. Федюк Р.С., Смоляков А.К., Тимохин Р.А. Строительные материалы для войсковой фортификации // XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием, посвященной 25-летию со дня образования Технического института (филиала) СВФУ Материалы конференции. Секции 1-3. 2017. С. 109 – 113.
9. 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. P. 195 – 204.

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. P. 77 – 83.
11. Shawnm P., Mohammad F. Compressive strength of foamed concrete in relation to porosity using SEM images // *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*. 2019. № 10 (1). P. 34 – 44.
12. Nambiar E.K.K. and Ramamurthy K. Sorption characteristics of foam concrete // *Cement and Concrete Research*. 2007. № 37. P. 1341 – 1347.
13. Khatib J.M., Clay R.M. Absorption characteristics of metakaolin concrete // *Cement and Concrete Research*. 2004. № 34 (1). P. 19 – 29.
14. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. High-volume, ultra-low-density fly ash foamed concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2017. № 69 (22). P. 1146 – 1156 <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.17.00063>
15. Just A., Middendorf B. Microstructure of high-strength foam concrete // *Materials Characteristics*. 2009. № 60 (7). P. 741 – 748.
16. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review // *International Journal of Materials Science Engineering*. 2014. № 2 (2). P. 152 – 157.
17. Nambiar E.K., Kunhanandan K. Influence of filler type on the properties of foam concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2006. № 28 (5). P. 475 – 480.
18. Wee T.H., Daneti S.B., Tamilselvan T., Lim H.S. Air void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties // *ACI Materials Journal*. 2006. № 103 (1). P. 45 – 52.
19. Allard J.F. *Propagation of Sound in Porous Media*. Elsevier Science. Amsterdam. 1993.
20. Attenborough K. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces // *Journal of Sound and Vibration*. 1985. № 99 (4). P. 521 – 544.
21. Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media // *Journal of Fluid Mechanics*. 1987. № 176. P. 379 – 402.
22. Stinson M.R., Champoux Y. Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992. № 91 (2). P. 685 – 695.
23. Horoshenkov K.V., Swift M.J. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2001. № 110 (5). P. 2371 – 2378.
24. Neithalath N., Marolf A., Weiss J., Olek J. Modeling the influence of pore structure on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2005. № 3 (1). P. 29 – 40.
25. 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 // *Building and Environment*. 2005. № 94. P. 821 – 828.

References

1. Bhutta M.A.R., Tsuruta K., Mirza J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2012. 31. P. 67 – 73.
2. Fedjuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Sovremennye sposoby aktivacii vjazhushhego i betonnykh smesej (obzor). *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. 4 (37). P. 85 – 99. (rus.)
3. Kim H., Hong J., Pyo S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete. *Applied Acoustics*. 2018. 138. P. 171 – 178.
4. Fedjuk R.S., Timohin R.A., Smoljakov A.K. Nauchnoe liderstvo kitajskih uchenyh v oblasti stroitel'nyh tehnologij. *Rossija i Kitaj: problemy strategicheskogo vzaimodejstvija: sbornik Vostochnogo centra*. 2017. 19. P. 21 – 24. (rus.)
5. Oancea I., Bujoreanu C., Budescu M., Benchea M., Gradinaru C.M. Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 203. P. 301 – 312.
6. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *Journal of Sound and Vibration*. 2015. 353. P. 378 – 394.
7. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5-5000 Hz. *Building and Environment*. 2019. 156. P. 12 – 20.
8. Fedjuk R.S., Smoljakov A.K., Timohin R.A. Stroitel'nye materialy dlja vojskovoj fortifikacii. XVIII Vse-rossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija molodyh uchenyh, aspirantov i studentov v g. Nerjungri, s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 25-letiju so dnja obrazovanija Tehniceskogo instituta (filiala) SVFU Materialy konferencii. Sekcii 1-3. 2017. P. 109 – 113. (rus.)

9. 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. P. 195 – 204.
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. P. 77 – 83.
11. Shawnim P., Mohammad F. Compressive strength of foamed concrete in relation to porosity using SEM images. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*. 2019. 10 (1). P. 34 – 44.
12. Nambiar E.K.K. and Ramamurthy K. Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and Concrete Research*. 2007. 37. P. 1341 – 1347.
13. Khatib J.M., Clay R.M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34 (1). P. 19 – 29.
14. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. High-volume, ultra-low-density fly ash foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2017. 69 (22). P. 1146 – 1156 <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.17.00063>
15. Just A., Middendorf B. Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characteristics*. 2009. 60 (7). P. 741 – 748.
16. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review. *International Journal of Materials Science Engineering*. 2014. 2 (2). P. 152 – 157.
17. Nambiar E.K., Kunhanandan K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2006. 28 (5). P. 475 – 480.
18. Wee T.H., Daneti S.B., Tamilselvan T., Lim H.S. Air void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *ACI Materials Journal*. 2006. 103 (1). P. 45 – 52.
19. Allard J.F. *Propagation of Sound in Porous Media*. Elsevier Science. Amsterdam. 1993.
20. Attenborough K. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *Journal of Sound and Vibration*. 1985. 99 (4). P. 521 – 544.
21. Johnson D.L., Koplik J., Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987. 176. P. 379 – 402.
22. Stinson M.R., Champoux Y. Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992. 91 (2). P. 685 – 695.
23. Horoshenkov K.V., Swift M.J. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2001. 110 (5). P. 2371 – 2378.
24. Neithalath N., Marolf A., Weiss J., Olek J. Modeling the influence of pore structure on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2005. 3 (1). P. 29 – 40.
25. 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. *Building and Environment*. 2005. 94. P. 821 – 828.

**Fedyuk R.S. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Baranov A.V.,**

Far Eastern Federal University, Russia,

Mugahed Amran Y.H.,

Prince Sattam Bin Abdulaziz University, Saudi Arabia

*Corresponding author E-mail: roman44@yandex.ru

EFFECT OF POROUS STRUCTURE ON SOUND ABSORPTION OF CELLULAR CONCRETE

Abstract: the compositions of gas and foam concrete with improved acoustic characteristics were developed. The optimal form of porosity, which contributes to the absorption of sound waves, both in the range of audible frequencies and at infrasonic and ultrasonic frequencies, is revealed. The mathematical model for designing sound-absorbing concrete was improved, taking into account both the porosity of the composite and the influence of the porous aggregate. The laws of synthesis of aerated concrete and foam concrete are established, which consist in optimizing the processes of structure formation due to the use of a polymineral cement-ash binder and blowing agent. The composition of the composite intensifies the process of hydration of the system, which leads to the synthesis of a polymineral heterodisperse matrix with an open porosity of more than 60%. Peculiarities of the influence of the “Portland cement – aluminosilicate – complex of modifiers” system on the rheology of the concrete mixture was identified, which can significantly reduce shear stress and create easily formed cellular concrete mixtures. The increased activity and granulometry of aluminosilicates predetermine an increase in the number of contacts and mechanical adhesion between particles during compaction, strengthening the frame of inter-pore septa. The mechanism of the influence of the composition of the concrete mixture on the microstructure of the composite is established. The presence of refined aluminosilicates and a complex of additives in the system along with cement contribute to the synthesis of the matrix with open porosity, thereby increasing the sound absorption coefficient.

Keywords: cellular concrete, porous aggregate, ash and slag mixture, sound absorption, structure, strength

Для цитирования: Федюк Р.С., Баранов А.В., Мугахед Амран Й.Х. Влияние пористой структуры на звукопоглощение ячеистого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 2. С. 5 –18. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18

For citation: Fedyuk R.S., Baranov A.V., Mugahed Amran Y.H. Effect of porous structure on sound absorption of cellular concrete. Construction Materials and Products. 2020. 3 (2). P. 5 – 18. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-2-5-18

Поступила в редакцию 5 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 7 февраля 2020г.

Одобрена для публикации 12 апреля 2020 г.

Received: January 5, 2020.

Revised: February 7, 2020.

Accepted: April 12, 2020