

Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих конструкций повышенного качества

Алексей Борисович Стешенко^{1*} , Александр Иванович Кудяков¹ , Александр Сергеевич Иноземцев² , Сергей Сергеевич Иноземцев² 

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: steshenko.alexey@gmail.com

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследования по повышению качества пенобетонных изделий путем направленного управления технологическими процессами структурообразования цементных композиций являются актуальными. Значительное влияние на прочность пенобетона оказывает прочность сцепления цементного камня с заполнителем. В данной статье рассматриваются способы химической и механохимической активации заполнителя пенобетона глиоксальсодержащими добавками, взаимодействия с продуктами гидратации вяжущих и повышения прочности контактной зоны. Управляя свойствами контактной зоны, можно улучшать качество пенобетона. **Материалы и методы.** Исследование проводилось с применением стандартных методик испытаний, указанных в национальных стандартах. **Результаты.** При предварительном химическом и механохимическом воздействии глиоксальсодержащими добавками поверхности песка и последующем введении его в пенобетонную смесь по сравнению с пенобетоном контрольного состава увеличивается класс пенобетона по прочности на сжатие до В1 при сохранении марки по средней плотности D500, при этом снижается значение усадки на 20–38,5% и коэффициента теплопроводности на 37%. **Выводы.** Применение добавок на основе глиоксала в пенобетонной смеси путем предварительной активации поверхности песка позволяет повысить качество цементного пенобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементный пенобетон, глиоксальсодержащие добавки, структурообразование, пластическая усадка, пористость, прочность на сжатие, средняя плотность, коэффициент теплопроводности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке НИУ МГСУ в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций и стратегических партнеров – членов Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» в целях исполнения Программы развития НИУ МГСУ на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стешенко А.Б., Кудяков А.И., Иноземцев А.С., Иноземцев С.С. Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих конструкций повышенного качества // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15, №5. С. 408–417. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-408-417>. – EDN: YNCWWI.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с концепцией развития строительной отрасли России до 2030 года важными задачами являются эффективное ресурсное обеспечение объектов жилищного, в том числе и индивидуально-строительного, строительства с максимальным использованием местного сырья, а также снижение энергозатрат

в производстве строительных материалов и эксплуатации зданий. Оптимальным решением поставленных задач является повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций, снижение стоимости возведения, обеспечение комфортной и безопасной среды для проживания путем использования для строительства зданий теплоизоляционного пенобетона повышенного качества. Теплоизоляционный

пенобетон в стеновых конструкциях обеспечивает хорошую теплозащиту жилья, требуемую несущую способность и долговечность [1].

При производстве эффективного по теплофизическим параметрам неавтоклавного пенобетона с низкой средней плотностью возникают проблемы в управлении процессами обеспечения стабильной ячеистой структуры, высокой прочности, уменьшения усадки при высыхании и теплопроводности [2, 3]. Для широкого применения неавтоклавного пенобетона в производстве изделий и в монолитном строительстве необходимо научно обосновать и разработать инновационные способы управления структурообразованием с целью повышения его качества [4].

Улучшение физико-механических свойств пенобетона достигается благодаря совершенствованию или разработке новых технологических приемов, позволяющих регулировать объемные структурообразующие процессы на разных масштабных уровнях, а именно: на микроуровне — цементная матрица; на контакте взаимодействующих компонентов — цементный камень — заполнитель; на макроуровне — прочный каркас из мелкого заполнителя (песка) [5].

Не зависимо от агрегатного состояния все компоненты пенобетона участвуют в механическом и физико-химическом взаимодействии при структурообразовании. При управляемой предварительной активации заполнителя повышается химическая активность поверхности зерен и ускоряется процесс взаимодействия с цементной матрицей на границе раздела фаз. Химическая или механохимическая активация заполнителя пенобетонной смеси при использовании структурно-феноменологического анализа взаимосвязи микроструктурных показателей с физико-механическими свойствами позволяет прогнозировать улучшение основных технологических и технических параметров качества пенобетона.

Установлено, что обработка заполнителя водными растворами кислот приводит к повышению химической активности поверхности, взаимодействию гидратных соединений цементного камня с зернами заполнителя, к повышению микротвердости контактной зоны и прочности пенобетона [6, 7].

В настоящее время достаточно хорошо изучен вопрос о применении модифицирующих добавок, влияющих на реологические свойства цементной матрицы и структурообразование пенобетонной смеси [8–12]. С использованием современных модифицирующих добавок управляют удобоукладываемостью и сроками схватывания пенобетонной смеси, снижают усадку, повышают однородность, а также прочность пенобетона до 25% [14–16], уменьшают расход цемента на 10–15% [9, 13]. Для получения наибольшего эффекта от действия модифицирующих добавок следует предварительно активировать поверхность заполни-

теля. Значительное влияние на прочность пенобетона оказывает прочность сцепления цементного камня с заполнителем [17]. Контактная зона — это важнейший структурный элемент пенобетона, управляя которым можно обеспечивать требуемые параметры качества проектируемого бетона.

В данной работе для химической и механохимической активации поверхности кварцево-полевошпатового песка предлагается использовать глиоксаль кристаллический и 40% водный раствор глиоксаля. В щелочной среде гидратирующегося цемента глиоксальная добавка взаимодействует с гидроксидом кальция, образующимся в результате гидролиза алита, минерала цемента, с образованием гликолята кальция $(\text{HO}-\text{CH}_2-\text{COO})_2\text{Ca}$, увеличением объема новообразований и матрицы пенобетона [18–21]. Гликолят кальция адсорбируется на иглообразных кристаллах этtringита, снижается объем порового пространства в цементном камне и увеличивается прочность [22, 23]. Исходя из этого предполагается, что при предварительной активации поверхности зерен заполнителя глиоксальевыми добавками и введении их в пенобетонную смесь можно уменьшить пористость и повысить прочность цементного камня в контактных зонах с зернами заполнителя, что позволит повысить физико-механические параметры качества пенобетона.

Цель исследования — установить закономерности химической и механохимической активации заполнителя глиоксальевыми добавками на структурообразование и свойства цементного пенобетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении исследований использовались материалы, представленные в табл. 1.

Технические характеристики глиоксальевых добавок представлены в [1].

Физико-механические свойства пенобетона определялись в соответствии с требованиями национальных стандартов:

- испытание и оценка качества пенобетона — ГОСТ 25485–2019;
- средняя плотность — ГОСТ 12730.1–2020;
- предел прочности на сжатие и оценка качества партии (серии) из 6 образцов — ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 18105–2018;
- теплопроводность — ГОСТ 7076–99 с использованием измерителя теплопроводности ИТС-1.

Определение пластической усадки осуществлялось по авторской методике, представленной в [8].

Структура порового пространства пенобетонов исследовалась с использованием двухлучевого растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D в режиме низкого вакуума при стабильном ускоря-

Таблица 1

Сырьевые материалы для пенобетонной смеси

Наименование материала	Соответствие требованиям нормативного документа
Портландцемент ЦЕМ I 42.5Н Топкинского завода	ГОСТ 31108-2020
Кварцево-полевошпатовый песок Кудровского месторождения Томской области с модулем крупности 1.8	ГОСТ 8736-2014
Пенообразователь ПБ-2000	ТУ 2481-185-05744685-01; ГОСТ 24211-2008
Водопроводная вода	ГОСТ 23732-2011
40% водный раствор глиоксаля (ТД «Новохим» г. Томск)	ТУ 2633-003-67017122-2011
Глиоксаль кристаллический (ТД «Новохим» г. Томск)	ТУ 2633-004-67017122-2011

Таблица 2

Контрольный состав пенобетона

Марка пенобетона по плотности	Расход исходных материалов на 1 м ³			
	портландцемент, кг	кварцево-полевошпатовый песок, кг	водопроводная вода, кг	пенообразователь, л
D500	270	135	202	1,3

ющем напряжении до 20 кВ. Исследование пористой структуры пенобетона проводилось методом ртутной порометрии на порозиметре Quantachrome 33.

Контрольный состав пенобетонной смеси разрабатывался в соответствии с требованиями СН 277-80 (табл. 2).

Приготовление пенобетонной смеси производилось по одностадийной технологии с использованием лабораторного смесителя.

На основе ранее полученных данных была разработана блок-схема исследований теплоизоляционного цементного пенобетона, модифицированного глиоксальевыми добавками (рис. 1).

Научное обоснование и выбор модифицирующей добавки

Ранее проведенными исследованиями водопотребности, кинетики раннего структурообразования и твердения цементного камня с глиоксальной добавкой установлен положительный эффект, что и явилось основанием выбора добавки для реализации поставленной цели [1, 9, 23, 24].

Установление способа введения и оптимального содержания глиоксальсодержащих добавок в пенобетонную смесь

По результатам анализа различных известных способов активации, последовательности введе-

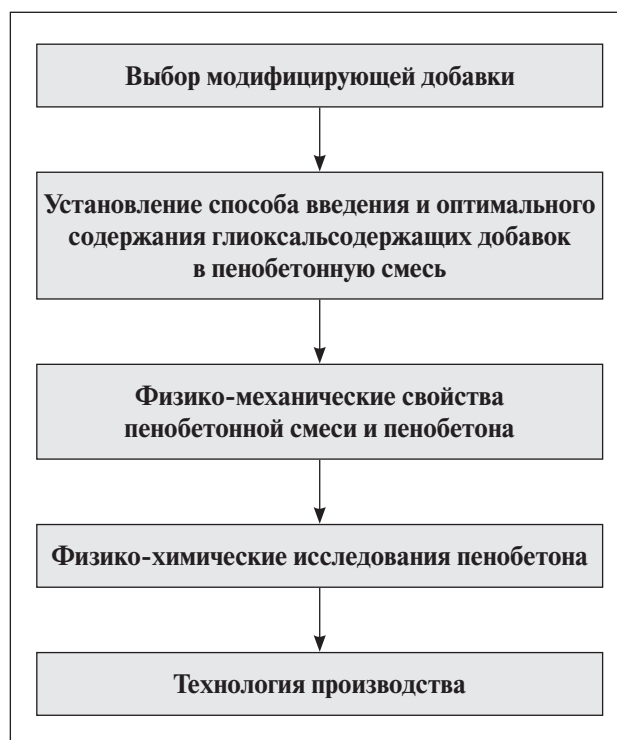


Рис. 1. Блок-схема исследований пенобетона

ния модифицирующих добавок в процессе приготовления пенобетонной смеси, с учетом процесса взаимодействия компонентов цементного камня с заполнителем принято, что перспективными яв-

ляются способы предварительной раздельной или совместной механической и химической активации поверхности заполнителя глиоксальсодержащими добавками.

При проведении было научно обосновано два технологических приема предварительной активации поверхности кварцево-полевошпатового песка глиоксальсодержащими добавками и введения его в пенобетонную смесь:

- 40% водный раствор глиоксаля предварительно распылением (пульверизатором) наносился на поверхность кварцево-полевошпатового песка с последующим введением в бетоносмеситель.
- сухой кварцево-полевошпатовый песок измельчался в мельнице совместно с глиоксалем кристаллическим. Активация поверхности песка осуществляется за счет одновременной дефор-

мации сжатия и сдвига (истирания), а также химического взаимодействия глиоксальной добавки с поверхностью заполнителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований использовалась пенобетонная смесь с подвижностью 11–14 см (диаметр расплыва на приборе Суттарда) и В/Т в отношении смеси, равном 0,5 [8, 9, 25].

Результаты исследования структуры пенобетона, высушенного до постоянной массы, с активированным и неактивированным заполнителем представлены на рис. 2.

В пенобетоне без активированного песка наблюдается перфорация и объединение стенок пор, что способствует развитию процесса седиментации,

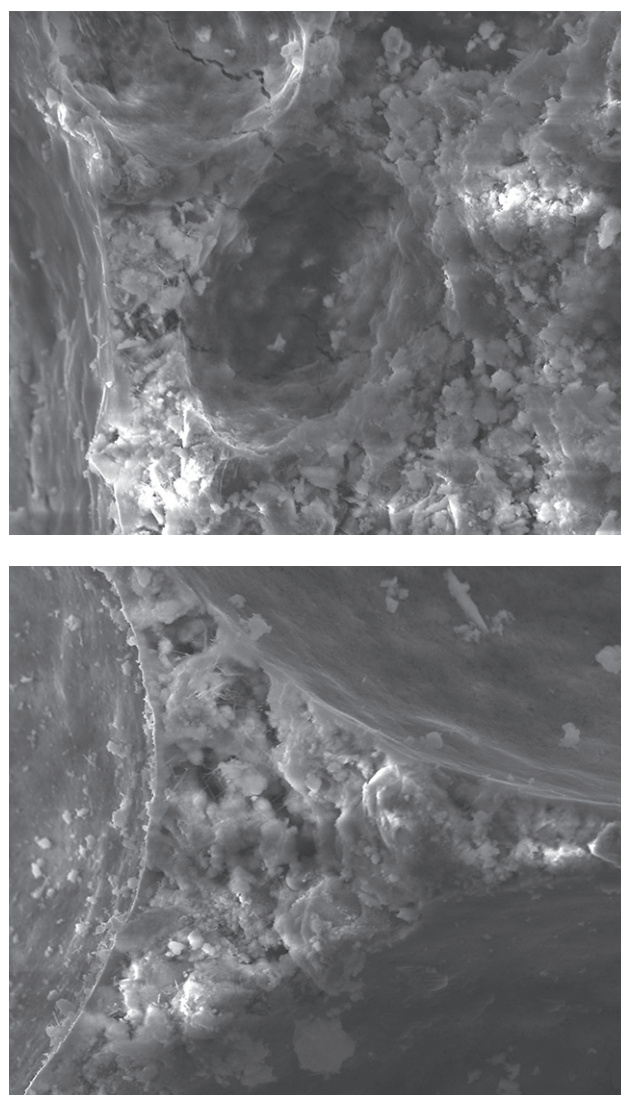
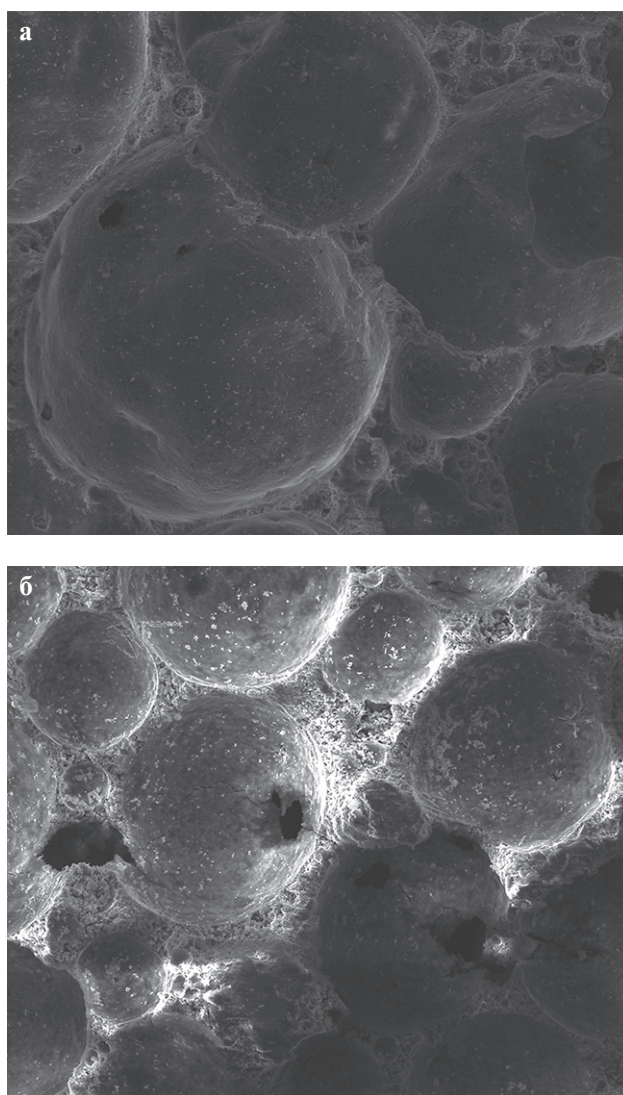


Рис. 2. Структура цементного пенобетона. Слева увеличение в 250 раз, справа в 2000 раз: а) без добавок; б) помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,01%

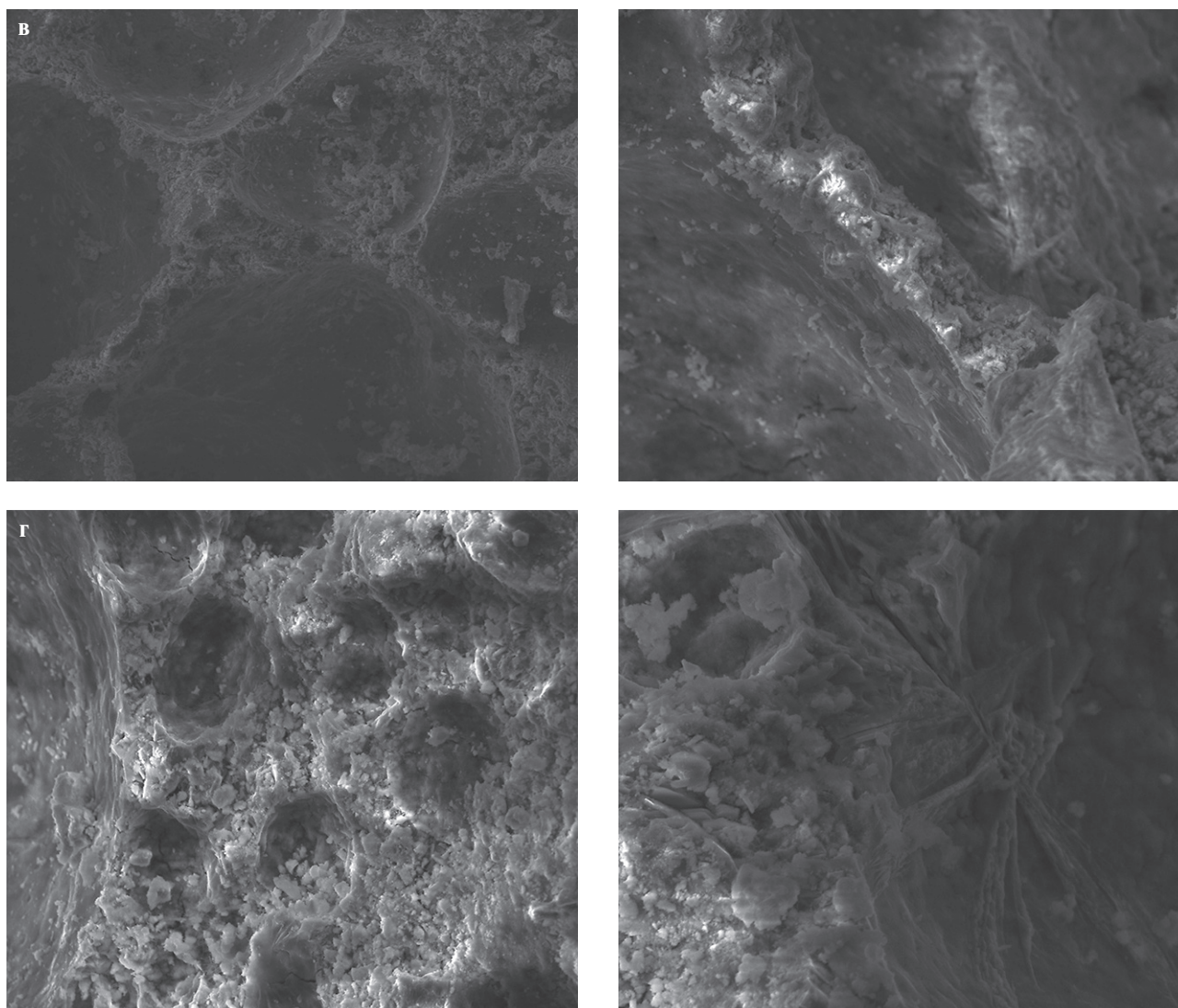


Рис. 2. Структура цементного пенобетона. Слева увеличение в 250 раз, справа в 2000 раз: в) обработка песка 40% водным раствором глиоксаля; г) помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,05%

снижению однородности микроструктуры. Пенобетон с химической и механохимической активацией глиоксальными добавками имеет более однородную структуру, поры равномерно заполняют весь объем материала, увеличивается площадь контактов цементной матрицы. Предварительная активация песка способствует формированию стабильной структуры пенобетона с замкнутыми мелкодисперсными порами.

Результаты исследования структуры пенобетона с активированной поверхностью песка приведены в табл. 3.

По результатам исследований установлено, что при механохимической активации песка помолем с глиоксалем кристаллическим средний диаметр пор пенобетона уменьшается с 45,8 до 36,9 мкм, среднее квадратичное отклонение среднего диаметра снижается с 23,6 до 12,1, а содержание условно замкну-

тых пор пенобетона увеличилась с 25,6% до 35,8% по сравнению с образцами без добавок. Установлено также, что увеличение полидисперсного распределения пор по размерам соответствует снижению качества пенобетона.

На рис. 3 представлены результаты исследований по определению значений прочности на сжатие и средней плотности образцов пенобетона с песком, активированном глиоксальными добавками.

Установлено, что при механохимической активации песка глиоксалем кристаллическим наблюдается увеличение предела прочности на сжатие пенобетона в 28-суточном возрасте на 66%, а при химической активации песка распылением 40% водным раствором глиоксаля — на 42%.

В результате абсорбирования гликсальсодержащей добавки на поверхности наиболее тонкоди-

Таблица 3

Пористость образцов пенобетона

Пенобетон с активированным песком	Средняя плотность, кг/м ³	Средний диаметр пор, мкм	δ диаметра пор	Пористость общая, %	Объем открытых капиллярных пор, %	Объем открытых некапиллярных пор, %	Пористость условно замкнутых пор, %
Контрольный	470	45,8	23,6	79,57	21,5	25,57	0,04
Обработка песка 40% раствором глиоксаля	480	40,1	22,5	77,89	15,6	25,17	0,03
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,01%	480	36,9	12,1	6,99	10,1	35,80	0,03
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,05	487	39,2	18,9	77,06	13,7	28,80	0,03

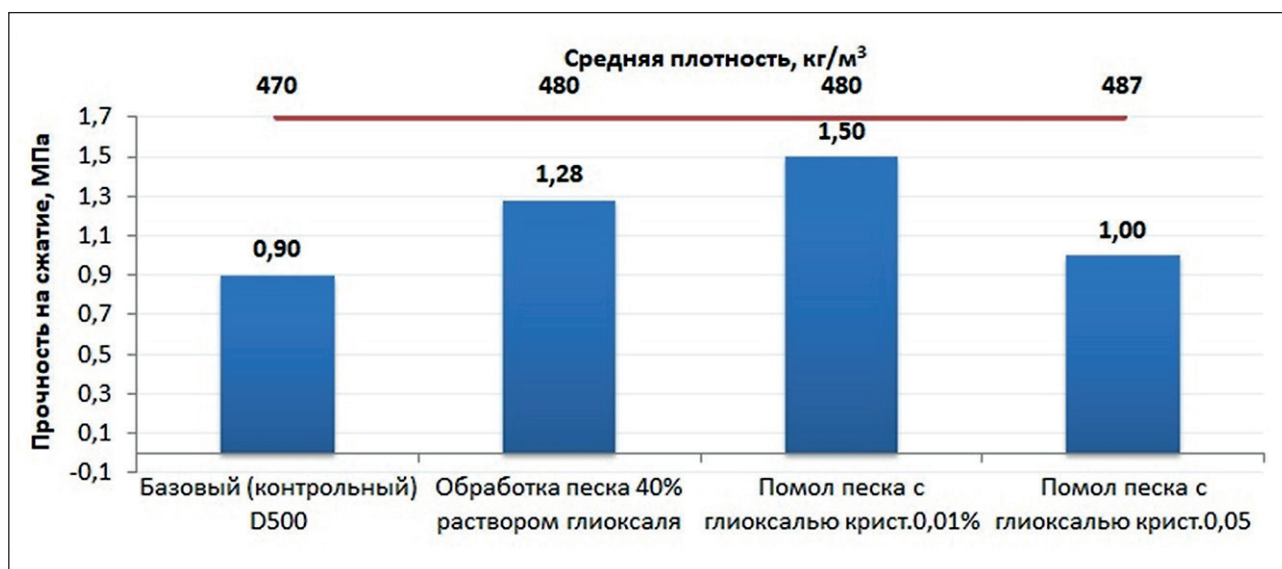


Рис. 3. Влияние способа обработки исходных материалов пенобетона глиоксальной добавкой на его прочностные характеристики

сперсных частиц цемента и гидратных новообразований наблюдается повышение прочности теплоизоляционного пенобетона [7, 21, 25]. Поэтому цементный камень контактной зоны и околпорового пространства пенобетона обладает более высокими прочностными характеристиками, чем цементный камень в объеме пенобетона.

Таким образом, при механохимической активации песка с глиоксалем кристаллическим в количестве 0,01% от массы цемента прочность на сжатие пенобетона марки D500 повышается до 1,5 МПа. Положительное влияние активации песка с добавкой на прочность пенобетона объясняется тем, что активированный кварцево-полевошпатовый песок

с более высокой удельной поверхностью со временем интенсивнее реализовывает свою реакционную активность, чем немолотый [5, 17].

Данные по однородности параметров качества по средней плотности и прочности при сжатии пенобетона представлены в табл. 4 и 5.

В пенобетоне с механохимически активированным песком с оптимальным содержанием глиоксальной добавки (0,01%) коэффициент вариации средней плотности пенобетона снизился с 3,4 до 0,54%, а коэффициент вариации прочности при сжатии с 10,5 до 7,1%. При совместном помоле песка с глиоксалем и обработке песка 40% раствором глиоксаля класс пенобетона повысился до B1 при сохранении марки

Таблица 4

Статистическая обработка данных по средней плотности пенобетона

Вид пенобетона	Среднее значение, кг/м ³	Марка бетона по средней плотности	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Без добавок	470	D500	9,9	3,4
Обработка песка 40% раствором глиоксаля	480	D500	3,3	0,67
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,01%	480	D500	2,6	0,54
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,05%	487	D500	4,6	1,30

Таблица 5

Статистическая обработка данных по прочности при сжатии пенобетона

Вид пенобетона	Среднее значение, МПа	Класс по прочности на сжатие	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
Без добавок	0,9	B0,5	0,055	10,5
Обработка песка 40% раствором глиоксаля	1,28	B1	0,12	9,2
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,01%	1,5	B1	0,048	7,1
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,05%	1,0	B1	0,056	7,6

по плотности D500. В соответствии с экспериментальными данными получен пенобетон со средней плотностью от 470 до 487 кг/м³, что соответствует марке D500.

Для составов с максимальными результатами по прочности на сжатие были проведены исследования по влиянию химической и механохимической активации песка глиоксальными добавками на пластическую усадку пенобетонной смеси, а также коэффициент теплопроводности пенобетона.

В раннем возрасте, когда смесь еще пластична, испарение свободной воды с поверхности бетона и пластическая усадка являются основными факторами трещинообразования. Измерение пластической усадки осуществлялось в течение 3 часов.

При совместной механохимической активации песка глиоксалем кристаллическим в количестве 0,01% от массы цемента пластическая усадка пенобетонной смеси снижается на 61% по сравнению с контрольным образцом (рис. 4). Причиной более высокой усадки образцов является перфорация стенок и повышенная неоднородность пор.

Снижение усадочных деформаций пенобетона с песком, активированном глиоксальной добавкой, при естественном твердении позволяет прогнозировать пониженный уровень напряжений при структурообразовании и, как следствие, повышенную эксплуатационную надежность изделий, изготовленных из этого материала [2, 16, 25].

На теплоизоляционные свойства пенобетона влияют общий объем, размер и равномерность распределения пор в пенобетоне. По результатам проведенных исследований структуры и средней плотности пенобетон с активированным глиоксальными добавками песком обладает более однородной структурой. По результатам испытаний, приведенным в табл. 6, значения коэффициента теплопроводности изменяются в соответствии с маркой по средней плотности пенобетона, что объясняется для пенобетонной матрицы однородностью пористой структуры.

Как следует из табл. 6, наименьшим коэффициентом теплопроводности (0,063 Вт/м·°C) обладает пенобетон на песке, активированном путем совместного помола песка с глиоксалем кристаллическим в количестве 0,01% от массы цемента.

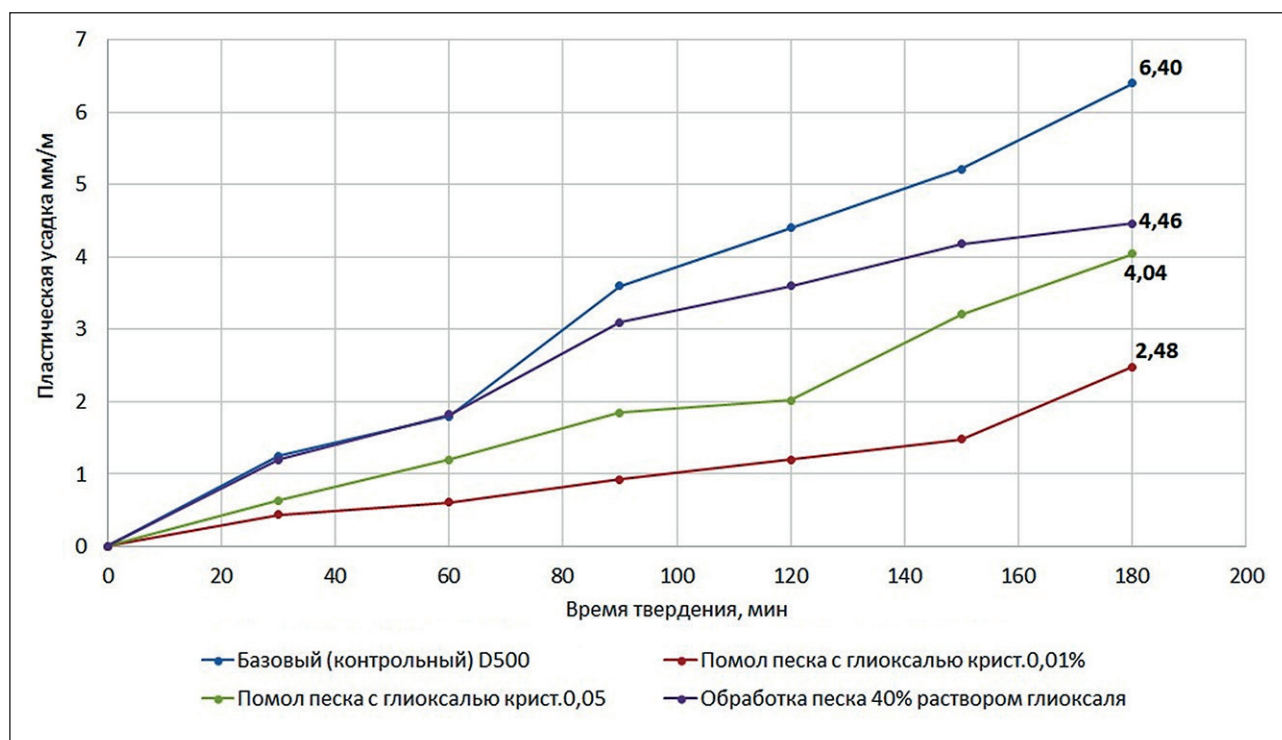


Рис. 4. Пластическая усадка пенобетонной смеси с песком, активированным глиоксальной добавкой

Таблица 6

Значения коэффициента теплопроводности образцов пенобетона

Вид пенобетона	Коэффициента теплопроводности, Вт/м·°С	
	при влажности 25%	в сухом состоянии
Контрольный	0,20	0,10
Обработка песка 40% раствором глиоксали	0,17	0,08
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,05%	0,17	0,07
Помол песка с глиоксалем кристаллическим 0,01%	0,16	0,06

Предварительная активация поверхности песка глиоксальевыми добавками позволяет производить цементный пенобетон с улучшенными параметрами качества.

ВЫВОДЫ

1. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, средний диаметр пор в пенобетоне с песком, предварительно активированном глиоксалем кристаллическим, уменьшается с 45,8 до 36,9 мкм, среднее квадратичное отклонение среднего диаметра снижается с 23,6 до 12,1, а со-

держание условно замкнутых пор увеличивается с 25,6% до 35,8% по сравнению с образцами без добавок.

2. При предварительном физико-химическом воздействии добавками на поверхность заполнителя при последующем введении его в пенобетонную смесь усадка пенобетона уменьшается на 30–61%.

3. В пенобетонах с глиоксальевыми добавками снижается коэффициент вариации средней плотности пенобетона с 3,4 до 0,6% и прочности при сжатии пенобетона с 10,5 до 7,1%, что позволяет повысить класс пенобетона до В1 при сохранении марки по средней плотности D500.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kudyakov A.I., Simakova A.S., Steshenko A.B. Cement based compositions with complex modifying additives based on glyoxal. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(6): 760–771. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771>
2. Klemczak, B., Gołaszewski, J., Cygan, G., Smolana, A., Gołaszewska, M. Analysis of methods reducing early age shrinkage of ultra-light foam concrete with phase change material. *International RILEM conference on synergising expertise towards sustainability and robustness of cement-based materials and concrete structures. SynerCrete*. 2023; 43. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_102
3. Guanzheng Zh., Ray Kai L.S. A review on durability of foam concrete. *Buildings*. 2023; 13: 1880. <https://doi.org/10.3390/buildings13071880>
4. Markin V., Nerella V.N., Schröfl C., Guseynova G. and Mechtcherine V. Material design and performance evaluation of foam concrete for digital fabrication. *Materials*. 2019; 12: 2433. <https://doi.org/10.3390/ma12152433>
5. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part I.. *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2022; 14(3): 176–189. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189>
6. Gencil O., Bilir T., Bademler Z., Ozbakkaloglu T. A detailed review on foam concrete composites: ingredients, properties, and microstructure. *Appl. Sci*. 2022; 12: 5752. <https://doi.org/10.3390/app12115752>
7. Eliseeva, N., Eliseev, N. Regulation of foam stability for non-autoclave foam concrete with additives of colloidal nature. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. Lecture Notes in Networks and System*. 2021; Vol. 402. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_15
8. Steshenko A.B., Kudyakov A.I., Ryabtseva N.E. Cement based foam concrete with hardening accelerators. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2020; 911: 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/911/1/012003>
9. Steshenko A.B., Kudyakov A.I., Lukyanchikov S.A., Nasyrov V.A. Construction and heat-insulating foam concrete with the use of drilling sludge. *AIP Conf. Proc*. 2022; 2696: 020008-1–020008-5. <https://doi.org/10.1063/5.0117016>
10. Song N., Li Zh., Yi W., Wang Sh. Properties of foam concrete with hydrophobic starch nanoparticles as foam stabilizer. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56: 104811. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104811>
11. Hao Y., Yang G., Liang K. Development of fly ash and slag based high-strength alkali-activated foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 128: 104447. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104447>
12. Kim D.V., Bazhenova S.I., Nguyen T.Ch., Tang V.L., Do M.Ch., Le V.L., Hoang M.Th. Insulation properties and performance of foam concrete using blast furnace slag. *Structural integrity and life*. 2022; 22 (1): 48–56.
13. Dien V.K., Ly N.C., Lam T.V., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019; 1425: 012199. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012199>
14. Xiong Y., Pang B., Liu Zh., Liu Ch., Hu Zh, Ligu Ma L. Effect of foam temperature on foam stability of foamed concrete and stabilization mechanisms. *Journal of Building Engineering*. 2023; 77(6):107492. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107492>
15. Gökçe M., Toklu K. Ultra-low density foam concrete production using electrolyzed water. *Journal of Testing and Evaluation*. 2022; 50: 2. <https://doi.org/10.1520/JTE20210224>
16. Mansyur, Tjaronge M.W., Irmawaty R., Amiruddin A.A. Early age of volume weight, indirect tensile strength and tensile elastic modulus of foam concrete containing blended cement. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2022; 1117: 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012025>
17. Кудяков В.А., Кудяков А.И., Лукьянчиков С.А., Кудяков К.Л. Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. №6 (63). С.147–157.
18. Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Volkova V.A. Kul'chenko K. Structurization processes in the system cement–water with chemical addition of glyoxal. *Russian Physics Journal*. 2014; 57 (2): 278–284. <https://doi.org/10.1007/s11182-014-0236-4>
19. Simakova A., Kudyakov A., Efremova V., Latypov A. The effects of complex glyoxal based modifiers on properties of cement paste and hardened cement paste. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1800: 020006. <https://doi.org/10.1063/1.4973022>
20. Fratzke A.R., Reilly P.J. Kinetic analysis of the disproportionation of aqueous glyoxal. *IJCK*. 1986;18757–773.
21. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Study of hardened cement paste with crystalline glyoxal. *Key Engineering Materials: Multifunctional Materials: Development and Application*. 2016; 683: 113–117. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.683.113>

22. Salomaa P. The kinetics of the Cannizzaro reaction of glyoxal. *Acta Chemica Scandinavica*. 1956;10(2): 311–319.
23. Кудяков А.И., Симакова А.С., Кондратенко В.А., Стешенко А.Б., Латыпов А.Д. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. Т. 20 (6). 138–147.
24. Sokolova Y., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Evaluation of dispersion interaction in glyoxal/silica organomineral system. *Journal of Physics Conference Series*. 2017; 929(1): 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/929/1/012110>
25. Steshenko A.B., Latypov A.D., Ryabtseva N.E. The deformation characteristics of the modified heat-insulating foam concrete. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020; 1611: 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1611/1/012046>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стешенко Алексей Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, steshenko.alexey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2468-3147>

Кудяков Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и технологий, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, kudyakow@mail.tomsknet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8927-6833>

Иноземцев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, InozemcevAS@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7807-688X>

Иноземцев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, inozemtsevss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2965-0846>

ВКЛАД АВТОРОВ

Стешенко Алексей Борисович – научное руководство; проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных; графическое и табличное представление результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Кудяков Александр Иванович – разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Иноземцев Александр Сергеевич – литературный обзор, обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения.

Иноземцев Сергей Сергеевич – литературный обзор, обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.09.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 06.10.2023.