

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.322:620.193.2

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

Роль заполнителей в процессах термовлажностной коррозии бетона

Наталья Максимовна Толыпина¹, Елена Николаевна Хахалева²,
Дмитрий Юрьевич Чашин¹, Даниил Александрович Толыпин¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Длительная эксплуатация бетонных изделий и конструкций в условиях повышенной температуры и влажности приводит к ухудшению физико-механических свойств бетона, что обусловлено изменением структуры и фазового состава цементной матрицы. В этой связи определенный интерес представляет исследование роли мелких заполнителей в процессах деструкции цементной матрицы при водо-тепловом воздействии.

Материалы и методы. Использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент»; промышленный отсев дробления кварцитопесчаника Лебединского горно-обогатительного комбината; мелкий заполнитель из дробленого кварцитопесчаника и гранита в лабораторных условиях. Предел прочности при сжатии и изгибе образцов определяли на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Микроструктуру изучали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3. Для анализа продуктов гидратации применяли синхронный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH. Испытания посредством ультразвукового контроля проводили на приборе «Пульсар 2.2».

Результаты. Установлено, что образцы бетона на кварцитопесчанике демонстрируют более высокий индекс термовлажностной стойкости по сравнению с образцами на гранитном заполнителе. Это объясняется большей активностью кварцитопесчаника по поглощению извести, что приводит к образованию термодинамически стабильных соединений в условиях повышенной влажности и температуры. Непрерывное увеличение скорости ультразвукового сигнала в образцах бетона термовлажностного твердения с исследуемыми заполнителями указывает на замедление деструктивных процессов, вызванных рекристаллизацией гидратных фаз. При этом благодаря взаимодействию минералов заполнителей с гидратными фазами повышаются сцепление с цементной матрицей и прочностные характеристики бетона.

Выводы. Комплексные исследования показали, что наиболее стабильные структуры в термовлажностных условиях создаются в мелкозернистых бетонах на основе кварцитопесчаника. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного подбора заполнителей с учетом их способности образовывать термостабильные гидратные фазы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементный камень, мелкозернистый бетон, активные минеральные добавки, термическая коррозия, прочность, микроструктура, фазовый состав

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н., Чашин Д.Ю., Толыпин Д.А. Роль заполнителей в процессах термовлажностной коррозии бетона // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 12. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

Автор, ответственный за переписку: Елена Николаевна Хахалева, NahalevaEN@mgsu.ru.

The role of aggregates in hygrothermal corrosion of concrete

Natalia M. Tolypina¹, Elena N. Khakhaleva², Dmitriy Yu. Chashin¹, Daniil A. Tolypin¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Long-term operation of concrete products and structures under conditions of elevated temperature and humidity leads to deterioration of the physical and mechanical properties of concrete, which is caused by changes in the structure and phase composition of the cement matrix. In this regard, the study of the role of fine aggregates in the processes of cement matrix destruction under water-thermal exposure is of particular interest.

Materials and methods. Materials used for research: Portland cement CEM I 42.5N manufactured by "Oskolcement" CJSC; industrial screening of crushed quartzite sandstone by Lebedinsky Mining and Processing Plant; fine aggregate from crushed quartzite sandstone and granite in laboratory conditions. The compressive and bending strength of the specimens was determined using a hydraulic press PGM-100MG4. The microstructure was studied using a Tescan Mira 3 SEM. An STA 449 F1 Jupiter NETZSCH synchronous thermal analyzer was used to analyze the hydration products. Ultrasonic testing was performed using a Pulsar 2.2 device.

Results. It was established that concrete specimens made of quartzite sandstone exhibit a higher thermal and moisture resistance index compared to specimens made of granite aggregate. This is due to the higher absorption of lime by quartzite sandstone, which leads to the formation of thermodynamically stable compounds under conditions of high humidity and temperature. The continuous increase in the speed of the ultrasonic signal in the thermal and moisture-cured concrete specimens with the studied aggregates indicates a slowdown in the destructive processes caused by the recrystallization of hydrate phases. At the same time, due to the interaction of aggregate minerals with hydrated phases, the adhesion to the cement matrix and the strength characteristics of concrete increase.

Conclusions. Comprehensive studies showed that the most stable structures in thermo-humidity conditions are created in fine-grained concretes based on quartzite sandstone. The results obtained indicate the need for careful selection of aggregates, taking into account their ability to form thermostable hydrate phases.

KEYWORDS: cement stone, fine-grained concrete, active mineral additives, thermal corrosion, strength, microstructure, phase composition

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-19-00866) using equipment High Technology Centre of BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Tolypina N.M., Khakhaleva E.N., Chashin D.Yu., Tolypin D.A. The role of aggregates in hygrothermal corrosion of concrete. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):12. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

Corresponding author: Elena N. Khakhaleva, HahalevaEN@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема разрушения бетонных конструкций при экстремальных температурных и влажностных условиях в основном заключается в деструкции бетона при воздействии низких температур вследствие замерзания влаги в теле бетона или высоких температур при пожарах [1–8]. Существует ряд промышленных объектов, эксплуатирующихся в условиях повышенной температуры окружающей среды при одновременном воздействии влажности, близкой к 100 %, что оказывает большое влияние на физико-механические параметры и долговечность бетонных конструкций. При этом происходят интенсивные изменения в структуре, вызванные ростом пористости за счет перекристаллизации термически нестабильных гидратных фаз цементной матрицы, что приводит к ухудшению прочностных характеристик, снижению надежности и устойчивости [9–16]. Подобные условия возникают при контакте бетонных элементов с горячей водой или паром в градирнях тепловых и атомных электростанций [17–19], деривационных тоннелях гидроэлектростанций [20] и других объектах коммунального хозяйства. Ремонт и восстановление таких конструкций отличаются высокой трудоемкостью и значительной стоимостью, зачастую превышающей первоначальные капитальные затраты на строительство. Подтверждением этой проблемы можно условно считать нормированную периодичность капитального ремонта железобетонных

градирен: каждые 3–4 года¹. Специалистами отмечается [21], что в условиях высокой температуры и влажности разрушение бетонных конструкций может начаться уже через год.

Для повышения термовлажностной устойчивости цементных систем целесообразно использовать кремнеземсодержащие минеральные добавки, что способствует образованию термостабильных низкоосновных гидросиликатов кальция [22] и замедлению фазовых переходов. В связи с тем, что в термовлажностных условиях процессы фазообразования протекают более интенсивно, чем в нормальных, можно предположить, что минералы, входящие в состав заполнителей, будут более активно вступать во взаимодействие с гидроксидом кальция жидкой фазы бетона с образованием термодинамически устойчивых продуктов твердения. В этой связи особый интерес представляет заполнитель из кварцито-песчаника, отличающийся повышенной активностью по поглощению извести, обусловленной незавершенностью кристаллической структуры, по сравнению с традиционным гранитным заполнителем.

Данная работа посвящена исследованию трансформации структурно-механических свойств мелкозернистого бетона на заполнителях различного состава в условиях повышенной температурно-влажностной нагрузки. Правильный выбор заполнителей позволит разработать эффективные меры первичной

¹ Положение. Техническая эксплуатация промышленных зданий и сооружений. ПОТ РО 14000-004-98 : утв. Минэкономики РФ 12.02.98.

защиты и повышения долговечности бетонных конструкций при эксплуатации в условиях многофакторного водо-теплого воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент» (ГОСТ 31108–2020) ($C_3S = 61,59\%$, $C_2S = 14\%$, $C_3A = 6,83\%$, $C_4AF = 13,73\%$; $НГ = 26\%$; $t_{н.схв} = 230$ мин, активность 56,2 МПа). В качестве заполнителей мелкозернистого бетона использовали: промышленный отсев дробления кварцитопесчаника; мелкий заполнитель, полученный дроблением кварцитопесчаника и гранита в лабораторных условиях. Зерновой состав заполнителей приведен в табл. 1, химический — в табл. 2.

Изготавливали образцы размером $2,5 \times 2,5 \times 10$ см и $4 \times 4 \times 16$ см мелкозернистого бетона 1:3 из смеси нормальной консистенции (ГОСТ 310.4–81). Часть образцов твердела в нормальных условиях (20°C), часть в термовлажностных условиях (80°C) в лабораторной водяной бане LOIP LB-163. В установленные сроки (1, 3, 6 и 12 мес) определяли предел прочности при сжатии и изгибе с помощью гидравлического пресса ПГМ-100МГ4. Микроструктурные характеристики цементного камня исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3. Для анализа продуктов гидратации использовали синхрон-

ный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH. Испытания образцов мелкозернистого бетона при помощи метода ультразвукового контроля проводили на приборе «Пульсар 2.2». Образцы мелкозернистого бетона размером $4 \times 4 \times 16$ см подвергали ультразвуковому контролю в течение всего срока испытаний (24 мес) с периодичностью 1 раз в неделю.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали влияние заполнителей на термовлажностную коррозию бетонов. Результаты периодических определений предела прочности образцов при изгибе и сжатии после 1, 3, 6 и 12 мес твердения приведены в табл. 3. Образцы мелкозернистого бетона на основе гранита, твердевшие в нормальных условиях, показали наибольшую прочность, а при твердении в воде при 80°C более высокие прочностные показатели получены для образцов, изготовленных на кварцитопесчанике.

Полученные данные показывают, что в условиях термовлажностного твердения заполнитель принимает активное участие в формировании прочности.

По данным прочности при сжатии рассчитан коэффициент термовлажностной стойкости (табл. 4), который демонстрирует отношение предела прочности при сжатии образцов, твердевших в воде при

Табл. 1. Гранулометрический состав мелких заполнителей

Отсев дробления кварцитопесчаника						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	51,7	12,36	18,86	8,29	7,32	1,47
Полные остатки, %	51,7	64,06	82,92	91,21	98,53	100
Кварцитопесчаник						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	26,2	14,17	15,23	23,27	19,47	1,66
Полные остатки, %	26,2	40,37	55,6	78,87	98,34	100
Гранит						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	42,31	16,72	13,24	9,28	17,31	1,14
Полные остатки, %	42,31	59,03	72,27	81,55	98,86	100

Табл. 2. Химический состав заполнителей

Кварцитопесчаник											
Содержание оксидов, мас. %											
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	P ₂ O ₅	S		
86,24	0,27	2,39	2,16	1,58	0,89	1,34	0,69	0,11	0,06		
Гранит											
Содержание оксидов, мас. %											
п.п.п.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S
0,24	3,82	1,57	15,59	63,57	4,65	2,90	0,62	0,094	6,31	0,21	0,03

Табл. 3. Кинетика твердения образцов мелкозернистого бетона в различных термовлажностных условиях

Заполнитель	$R_{из}$, МПа, в сроки, мес				$R_{сж}$, МПа, в сроки, мес			
	1	3	6	12	1	3	6	12
	20 °С							
Отсев дробления кварцитопесчаника	4,04	5,04	10,2	13,98	34,46	40,5	40,37	39,07
Гранит	2,52	9,48	8,47	10,2	37,73	46,21	43,44	54,66
Кварцитопесчаник	3,52	7,14	9,91	16,7	32,49	43,82	47,04	48,05
80 °С								
Отсев дробления кварцитопесчаника	7,36	8,32	11,03	12,39	27,2	29,71	39,21	46,7
Гранит	2,1	13,36	12,78	16,33	29,0	36,0	38,98	38,7
Кварцитопесчаник	8,82	10,08	17,62	18,5	27,2	44,09	57,08	63,37

температуре 80 °С, к пределу прочности при сжатии при температуре 20 °С: $K_{терм.ст} = R_{сж}^{80} / R_{сж}^{20}$.

Как видно из табл. 4, наименьший коэффициент стойкости у образцов бетона на гранитном заполнителе, что свидетельствует о деградации материала при длительном термовлажностном воздействии. Образцы бетона на кварцитопесчанике показали монотонный рост коэффициента термовлажностной стойкости в течение всего периода испытаний: от 0,84 (1 мес) до 1,32 (12 мес), что указывает на высокую устойчивость структуры к водо-тепловым воздействиям.

Для постоянного контроля процессов деструкции бетона использовали метод ультразвуковой диагностики. Подъем и периодическое снижение скорости УЗ-импульса находятся во взаимосвязи с явлениями перекристаллизации. Скорость УЗ-сигнала представляет собой интегральный параметр, характеризующий комплекс структурно-механических свойств материала (прочности, пористости, трещинообразования и т.д.). Результаты приведены на рис. 1, 2. По данным мониторинга средней скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы мелкозернистого бетона, твердевшие в воде при 80 °С, установлено, что за весь период наблюдений прирост скорости составил у образцов на кварцитопесчанике +Δ538 м/с и на граните +Δ471 м/с. У образцов всех составов идет интенсивное увеличение скорости прохождения УЗ-сигнала до 8–10 мес пребывания в горячей воде, после чего наступает стабилизация до 24 мес. Это свидетельствует о том, что деструктивные процессы, связанные с рекристаллизацией гидратных фаз, протекают очень

Табл. 4. Коэффициент термовлажностной стойкости

Заполнитель	Время, мес			
	1	3	6	12
Отсев дробления кварцитопесчаника	0,79	0,73	0,97	1,2
Гранит	0,77	0,78	0,9	0,71
Кварцитопесчаник	0,84	1,01	1,21	1,32

медленно во всех случаях, существенного роста пористости не отмечается. Схожесть кривых скорости УЗ-импульса свидетельствует об аналогичности процессов структуро- и фазообразования.

Приведенные данные показывают, что процессы фазо- и структурообразования образцов мелкозернистого бетона на различных заполнителях в термовлажностных условиях протекают по другим закономерностям, чем в условиях нормального твердения. Продолжительный набор скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах обусловлен тем, что кварц, полевые шпаты и слюды кислого состава, входящие в состав кварцитопесчаника и гранита, в высокощелочной среде (с рН среды 12–12,5) подвергаются активации в той или иной степени. Они активно взаимодействуют с гидроксидом кальция, входящим в состав жидкой фазы бетона, с образованием гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, которые в разной степени содействуют уплотнению цементной матрицы и контактной зоны между заполнителем и цементной матрицей бетона. В соответствии с данными термодинамических расчетов активность кварца превосходит активность минералов группы полевых шпатов [23]. Результаты этого процесса отчетливо прослеживаются по данным УЗ-диагностики.

Для исследования процессов фазообразования в цементном камне готовились пробы для дифференциального термического анализа (ДТА) путем сушки образцов в сушильном шкафу и их дробления. Отделение гидратированного цемента от заполнителя производилось легким растиранием в фарфоровой ступке. Некоторое количество измельченного заполнителя оставалось в пробе с цементом, несмотря на осторожное просеивание через сито. В этой связи термографический анализ данных проб более надежен с качественной стороны.

У образцов мелкозернистого бетона, содержащих гранит и кварцитопесчаник, в нормальных условиях твердения (20 °С) наблюдаются схожие термические эффекты. В течение 12 мес сохраняются эндотермические эффекты при 400–500 °С, связан-

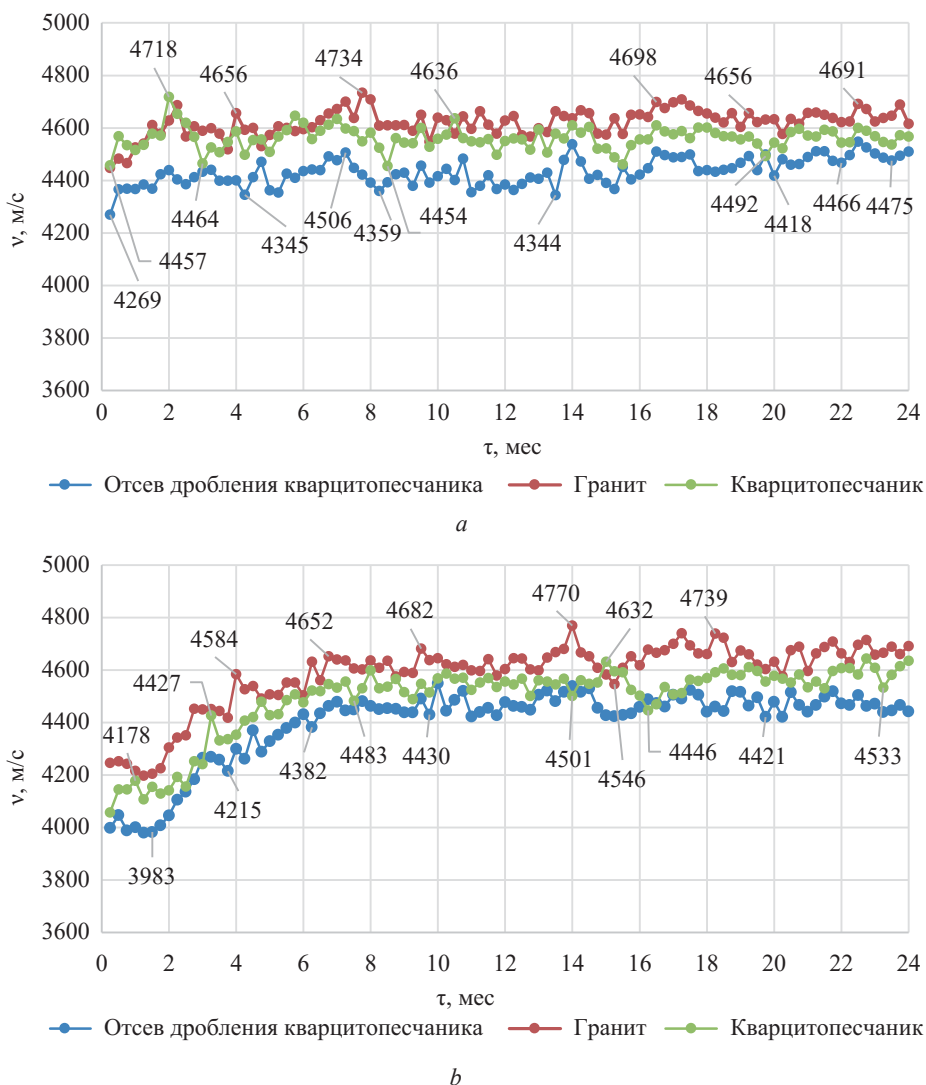


Рис. 1. Скорость прохождения ультразвука в образцах мелкозернистого бетона (1:3) на различных заполнителях, твердевших при температуре 20 °С (а) и 80 °С (б)

ные с разложением гидроксида кальция, более выражены у образца с гранитом. На кривой нагревания наблюдается двойной эндотермический эффект при температурах 95,8 и 139,2 °С, связанный с выделением свободной воды и дегидратацией высокоосновных продуктов типа С-S-H, С-A-H и С-A-S-H (рис. 2). Прослеживаются слабовыраженные эндотермические эффекты при 575 °С, связанные с перекристаллизацией кварца. Отмечаются эндотермические пики в диапазоне 640–750 °С, связанные с обезвоживанием гидросиликатов различного состава, которые могут накладываться на эндотермические эффекты разложения кальцита, образующегося вследствие карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и двухкальциевого силиката. К 24 мес интенсивность данных эндотермических эффектов уменьшается. Экзотермических эффектов не наблюдается.

При тепловлажностном твердении образцов мелкозернистого бетона (80 °С) происходит изменение термических эффектов, что свидетельствует об интенсивных процессах химических взаимодействий и об-

разовании новых фаз (рис. 3). На кривой нагревания (особенно с кварцитапесчаником) наблюдается увеличение эндотермического эффекта в диапазоне 90–280 °С, что объясняется высоким содержанием фазы типа С-S-H. Через 12 мес твердения на термограммах обоих составов не обнаруживается эффект гидроксида кальция. При этом фиксируется экзотермический эффект при температуре 860–900 °С, свидетельствующий о наличии гидросиликатов типа CSH(B). Эндозффекты при 720 °С характерны для низкоосновных гидросиликатов (гиролит $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$), которые совмещены с эндотермическими эффектами разложения кальцита. К основным изменениям в интервале 12–24 мес можно отнести снижение интенсивности эндотермических эффектов при температуре 640–750 °С. Это свидетельствует о том, что максимальные фазовые изменения в цементном камне, начавшиеся на первичной стадии твердения и продолжающиеся до одного года, затем переходят в фазу замедленной трансформации.

Авторами проведены электронно-микроскопические исследования образцов мелкозернистого бетона

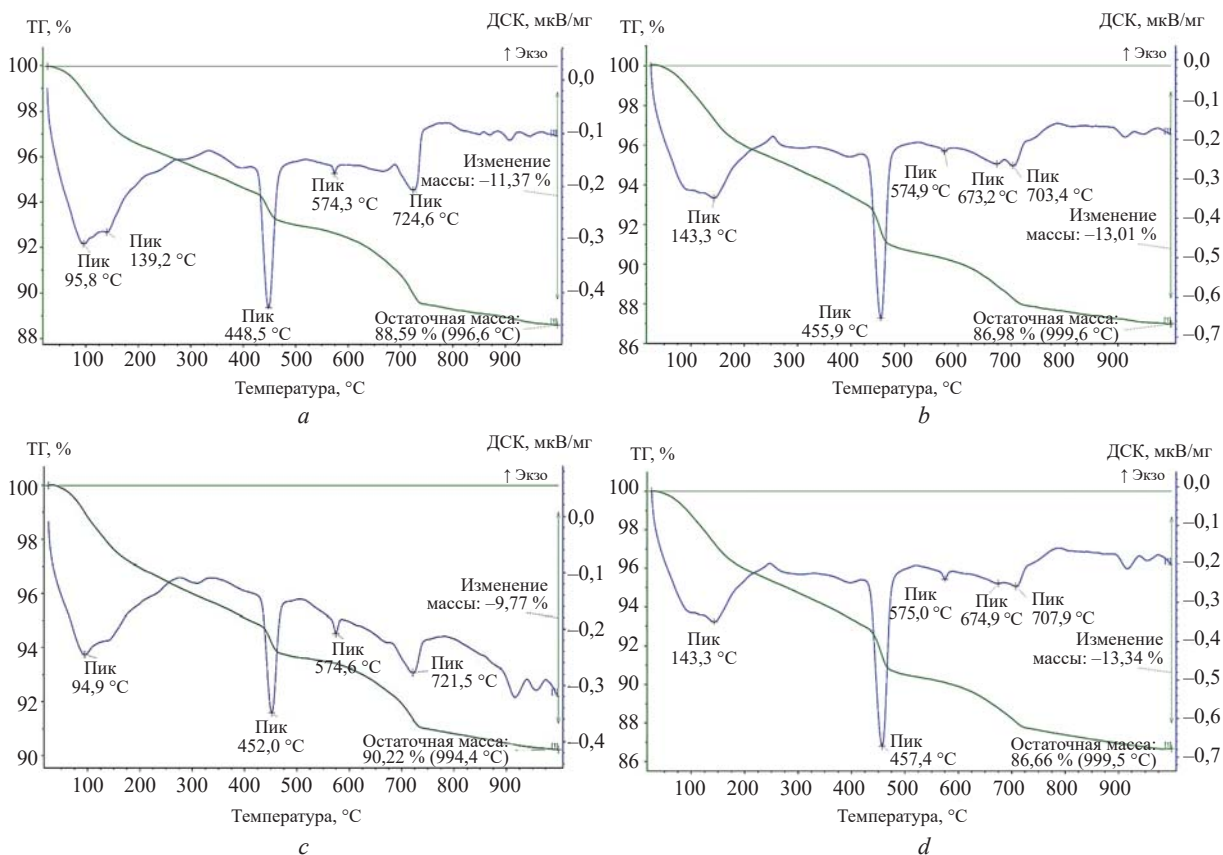


Рис. 2. Термограммы цементного камня мелкозернистого бетона, твердевшего при 20 °С. Заполнитель: *a* — гранит, 12 мес; *b* — гранит, 24 мес; *c* — кварцито-песчаник, 12 мес; *d* — кварцито-песчаник, 24 мес

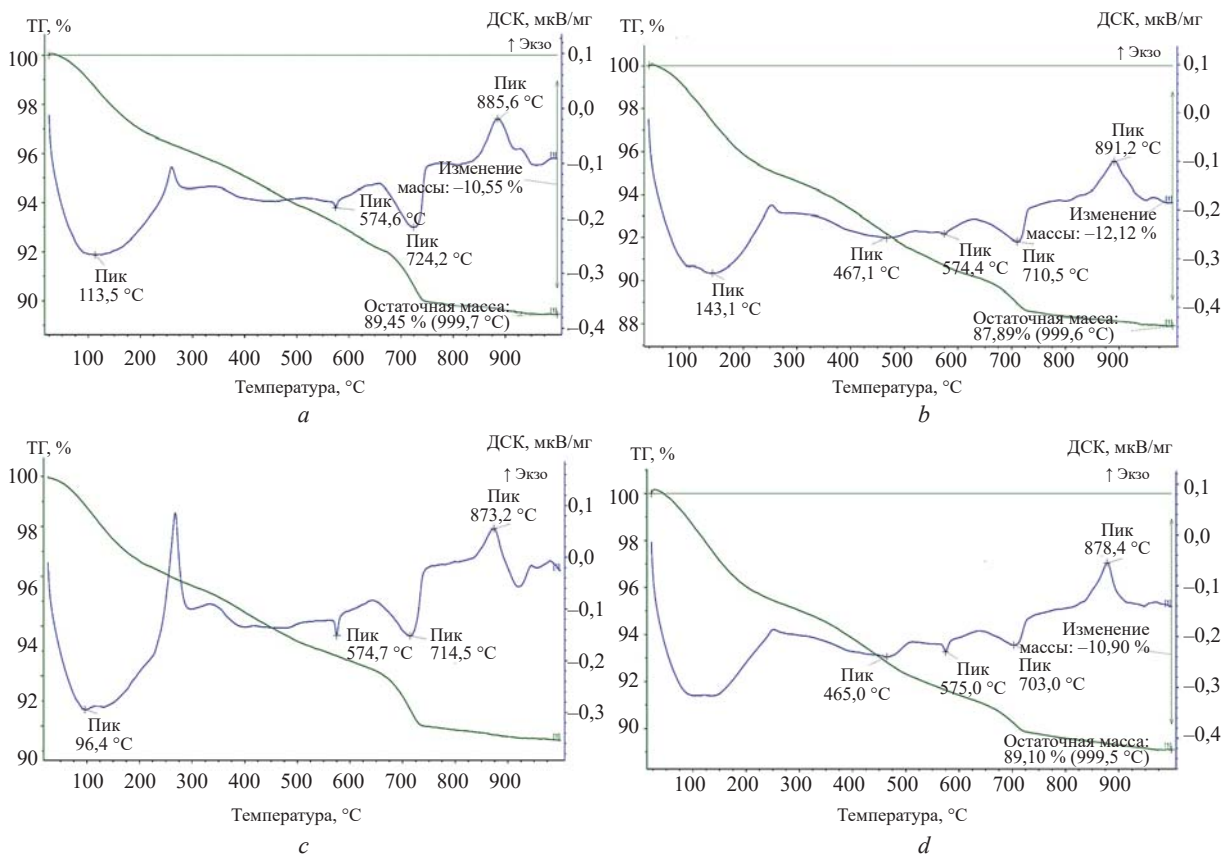


Рис. 3. Термограммы цементного камня мелкозернистого бетона, твердевшего при 80 °С. Заполнитель: *a* — гранит, 12 мес; *b* — гранит, 24 мес; *c* — кварцито-песчаник, 12 мес; *d* — кварцито-песчаник, 24 мес

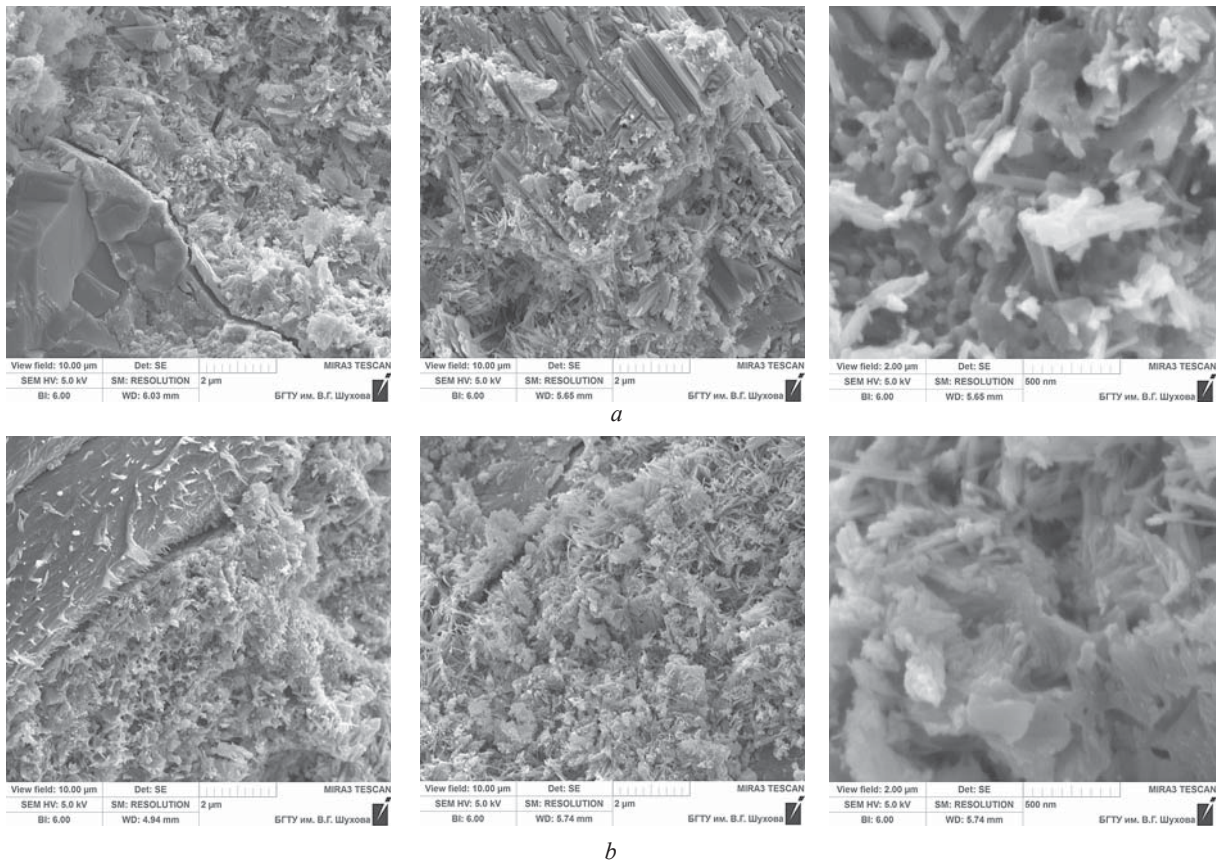


Рис. 4. Микроструктура цементной матрицы бетона, гидросиликаты кальция, 12 мес, 20 °С: *a* — гранитный заполнитель; *b* — кварцитопесчаник

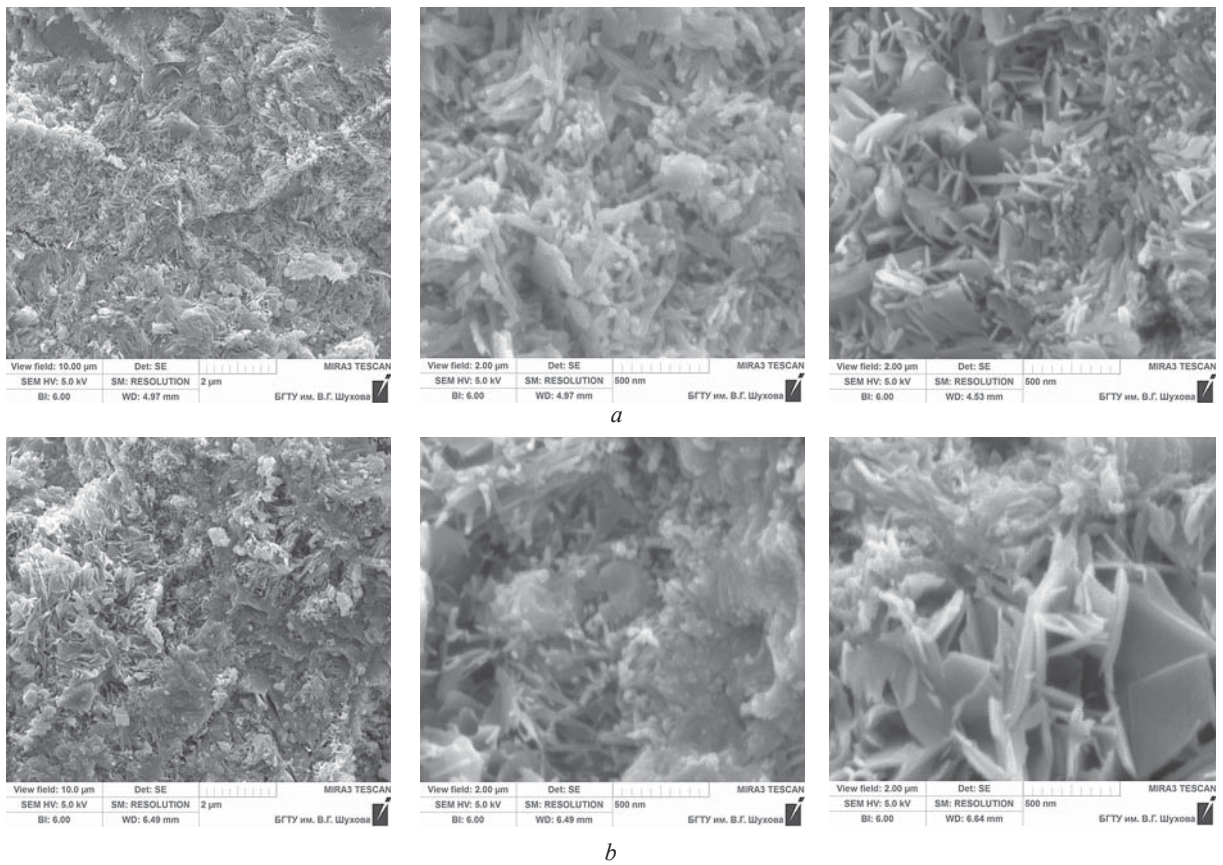


Рис. 5. Микроструктура цементной матрицы бетона, гидросиликаты кальция, 12 мес, 80 °С: *a* — гранитный заполнитель; *b* — кварцитопесчаник

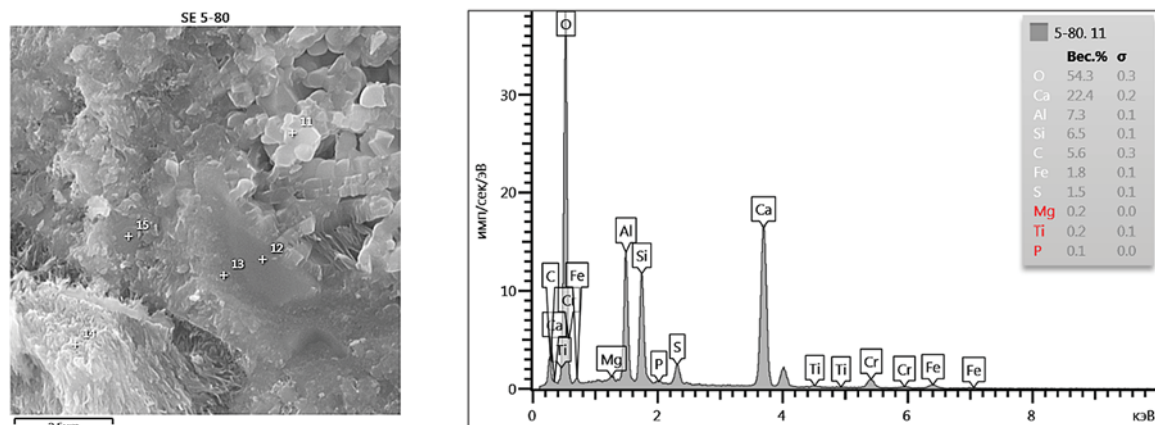


Рис. 6. Микроструктура цементной матрицы бетона на основе гранита, гидрогранаты, 24 мес, 80 °С

с заполнителем из гранита и кварцитопесчаника, твердевших 12 мес в нормальных условиях, которые показали, что микроструктура цементного камня в обоих случаях достаточно схожа (рис. 4). Наблюдается более-менее равномерное расположение волокнистых, хорошо различимых кристаллов высокоосновных гидросиликатов кальция в структуре цементной матрицы, положительно влияющее на прочность. Непрерывный рост хорошо сформированных волокон высокоосновных гидросиликатов кальция свидетельствует о развитии процессов старения цементного камня, твердеющего в воде длительный срок. Через один год нормального твердения кристаллы C_2SH_2 увеличиваются в размере до 2–3 мкм, образуя прочные сростки с портландитом $Ca(OH)_2$ (рис. 4).

При длительном твердении (один год) образцов мелкозернистого бетона в воде при 80 °С происходит увеличение доли хорошо закристаллизованных частиц (рис. 5) по отношению к гелеобразной матрице. Образуются четко оформленные волокнистые кристаллы 0,5–1 мкм, нередко в виде агломератов, с переходными гелеобразными зонами между ними. Наблюдаются поликристаллические участки в виде хаотично расположенных крупных пластинчатых кристаллов гидросиликатов кальция, что повышает степень неоднородности структуры. Организационная структура цементного камня обусловлена упорядоченным строением на отдельных микроучастках. Кристаллизация крупных поликристаллических сростков при их неравномерном распределении в структуре гидросиликатного геля нежелательна, так как часто приводит к деструктивным явлениям. С увеличением длительности твердения повышается степень кристалличности новообразований как в термовлажностных, так и в нормальных условиях твердения.

В связи с повышенным содержанием алюминия в граните при длительном твердении в термовлажностных условиях он связывается преимущественно в гидрогранаты, которые, несмотря на устойчивость, могут снижать прочность из-за усиления неоднородности структуры (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что заполнители из гранита и кварцитопесчаника повышают термостабильность мелкозернистого бетона. Наибольший коэффициент термовлажностной стойкости у образцов на кварцитопесчанике ($K_{\text{терм.ст}}^{12} = 1,20–1,3$), чем на граните ($K_{\text{терм.ст}}^{12} = 0,71$). Это обусловлено повышенной активностью по поглощению извести кварцитопесчаника по сравнению с гранитным заполнителем, что способствует формированию термодинамически устойчивых продуктов твердения в условиях повышенной влажности и температуры.

Постоянный рост скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы мелкозернистого бетона, твердевшие в воде при 80 °С, свидетельствует о том, что деструктивные процессы, связанные с рекристаллизацией гидратных фаз, протекают очень медленно в обоих случаях. При этом за счет химических процессов на поверхности зерен мелкого заполнителя происходит усиление срастания между ними и цементной матрицей, что повышает прочность бетона.

Процессы фазообразования в цементной матрице мелкозернистого бетона в повышенных термовлажностных условиях протекают по другим закономерностям, чем в условиях нормального твердения. Гидратные фазы цементного камня, прежде всего $Ca(OH)_2$, при повышенной температуре активно вступают в химическое взаимодействие с минералами мелких заполнителей, образуя термически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция $CSH(V)$, идентифицируемые по экзотермическому эффекту при 860–900 °С. При твердении в нормальных условиях свободная известь практически не связывается. Основным компонентом цементного камня является двухосновный гидросиликат кальция. Изменения фазового состава цементной матрицы бетона на кварцитопесчанике и граните достаточно схожи.

Полученные результаты имеют важное практическое значение и позволяют считать кварцитопесчаник ценным сырьем для изготовления бетона, стойкого к термовлажностной коррозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Chen J., Li Y., Li Y., Wen L., Guo H.* Effects of curing conditions with different temperature and humidity on damage evolution of concrete during freeze–thaw cycling // *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. Issue 2. DOI: 10.1617/s11527-022-01921-z
2. *Hager I.* Behaviour of cement concrete at high temperature // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 145–154. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
3. *Nishi H., Kasami H., Tayama T.* Effects of mix proportion on the strength and elasticity of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 711. Pp. 472–479. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.472
4. *Леонович С.Н., Зайцев Ю.В., Доркин В.В., Литвиновский Д.А.* Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и влажностных воздействиях : монография. М. : ИНФРА-М, 2018. 258 с. DOI: 10.12737/monography_59c9f9b9c34210.46897590. EDN ZVYZWH.
5. *Истомин А.Д., Петрова В.А.* Влияние отрицательных температур на прочность и деформативность железобетонного элемента // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 4. № 4. С. 3–12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.3-12. EDN QDOYLQ.
6. *Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В.* Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // *Строительные материалы*. 2019. № 3. С. 64–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66. EDN ZIKFHV.
7. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 12–17. EDN ZWUFVV.
8. *Низина Т.А., Коровкин Д.И., Балыков А.С., Володин В.В.* Анализ изменения упруго-прочностных характеристик модифицированных и немодифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от их влажностного состояния и температуры испытаний // *Градостроительство и архитектура*. 2019. Т. 9. № 1 (34). С. 71–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12. EDN JSFUJO.
9. *Славчева Г.С., Ким Л.В.* Механизмы и закономерности изменения прочностных характеристик бетонов в связи с их температурно-влажностным состоянием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 1 (22). С. 63–70. EDN TNULPV.
10. *Боруш О.В., Григорьева О.К.* Общая энергетика. Энергетические установки : учебное пособие. Новосибирск : НГТУ, 2017. 96 с. EDN VULPMT.
11. *Рябова Л.И.* Тампонажные растворы повышенного качества // *Бурение и нефть*. 2003. № 1. С. 30–31. EDN ORCJWF.
12. *Толытина Н.М., Чащин Д.Ю.* Деградация цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2024. Т. 20. № 3 (37). С. 109–117. EDN TORVVO.
13. *Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y.* Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 104906. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104906
14. *Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H.* Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5597918
15. *Толытина Н.М., Хахалева Е.Н., Данилов Д.Ю., Чащин Д.Ю.* Влияние микронаполнителей на эффективность суперпластификаторов и прочность бетонов с низким содержанием цемента // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 8. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15. EDN KBXBJU.
16. *Kodur V.K. R., Khaliq W.* Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 23. Issue 6. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225
17. *Камалова З.А., Смирнов Д.С.* Исследования и разработка мероприятий по восстановлению железобетонных конструкций градирни // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 4 (18). С. 233–237. EDN OKGCUH.
18. *Мазур В.А., Куценко Т.Н., Петров С.В.* Выбор рационального метода ремонта монолитных железобетонных оболочек градирен с учетом использования различных средств подмащивания // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 6 (146). С. 11–18. EDN FCPRGC.
19. *Калатузов В.А., Мошкарин А.В.* Современные основы технического перевооружения систем технического водоснабжения тепловых электростанций // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2008. № 2. С. 41–45. EDN PFJMFH.
20. *Василевская Л.С., Зюзин Р.С.* Оценка технического состояния деривационных туннелей на примере Храма ГЭС-II // *Гидротехника*. 2019. № 1 (54). С. 10–15. EDN FSOGSH.
21. *Калатузов В.А.* Проблемы обеспечения надежности железобетонных вытяжных башен градирен // *Энерго-INFO*. 2009. № 10 (33).
22. *Толытина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чащин Д.Ю.* Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками // *Вестник МГСУ*. 2025. № 20. № 2. С. 291–305.

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305. EDN CHCWNF.

23. Рахимбаев И.Ш., Толыпина Н.М. Термодинамический расчет активности в щелочной среде

минералов, входящих в состав заполнителей бетонов // Научные и инженерные проблемы строительной технологической утилизации техногенных отходов. 2014. № 13. С. 174–178. EDN SCUPXV.

Поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Наталья Максимовна Толыпина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

Елена Николаевна Хахалева — кандидат технических наук, доцент, помощник проректора; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-4868-2181; NahalevaEN@mgsu.ru;

Дмитрий Юрьевич Чашин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriychashin11@gmail.com;

Даниил Александрович Толыпин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-9920-7180; tolypin.daniil@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The problem of concrete structure failure under extreme temperature and humidity conditions mainly lies in the degradation of concrete when exposed to low temperatures due to the freezing of moisture within the concrete mass, or to high temperatures during fires [1–8]. There are a number of industrial facilities operating in environments with elevated ambient temperatures whilst simultaneously exposed to humidity levels close to 100 %, which has a significant impact on the physical and mechanical properties and durability of concrete structures. This leads to significant changes in the structure caused by an increase in porosity due to the recrystallisation of thermally unstable hydrated phases in the cement matrix, resulting in a deterioration of strength characteristics and a reduction in reliability and stability [9–16]. Such conditions arise when concrete elements come into contact with hot water or steam in cooling towers at thermal and nuclear power stations [17–19], diversion tunnels at hydroelectric power stations [20] and other public utility facilities. The repair and restoration of such structures are highly labour-intensive and costly, often exceeding the initial capital costs of construction. The standardized frequency of major repairs to reinforced concrete cooling towers every 3–4 years can be taken as indicative of this problem¹. Experts note [21] that, under con-

ditions of high temperature and humidity, the deterioration of concrete structures can begin as early as one year after construction.

To improve the thermal and humidity resistance of cementitious systems, it is advisable to use silica-containing mineral admixtures, which promote the formation of thermally stable, low-basic calcium hydrosilicates [22] and slow down phase transitions. Given that phase formation processes occur more intensively under thermal and humidity conditions than under normal conditions, it can be assumed that the minerals comprising the aggregates will interact more actively with the calcium hydroxide in the liquid phase of the concrete, forming thermodynamically stable hardening products. In this regard, quartzite sandstone aggregate is of particular interest, as it exhibits increased lime absorption activity due to its incomplete crystalline structure, compared to traditional granite aggregate.

This study examines the changes in the structural and mechanical properties of fine-grained concrete made with aggregates of varying compositions under conditions of elevated temperature and humidity. The correct selection of aggregates will enable the development of effective measures for the primary protection and enhancement of the durability of concrete structures when operated under conditions of multi-factor hydrothermal exposure.

MATERIALS AND METHODS

Portland cement CEM I 42.5N produced by “Oskolcement” CJSC (GOST 31108–2020) was used as

¹ Regulation. Technical operation of industrial buildings and structures. POT RO 14000-004–98: approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation on 12 February 1998.

the binder ($C_3S = 61.59\%$, $C_2S = 14\%$, $C_3A = 6.83\%$, $C_4AF = 13.73\%$; $NC = 26\%$; $t_{it.set} = 230$ min, activity 56.2 MPa). The following were used as aggregates for fine-grained concrete: industrial screenings from the crushing of quartzite sandstone; fine aggregate obtained by crushing quartzite sandstone and granite under laboratory conditions. The particle size distribution of the aggregates is given in Table 1, and their chemical composition in Table 2.

Specimens measuring $2.5 \times 2.5 \times 10$ cm and $4 \times 4 \times 16$ cm were produced from 1:3 fine-grained concrete

using a mixture of normal consistency (GOST 310.4–81). Some of the specimens were cured under normal conditions ($20^\circ C$), and some under warm and humid conditions ($80^\circ C$) in a LOIP LB-163 laboratory water bath. At specified intervals (1, 3, 6 and 12 months), the compressive and flexural strengths were determined using a PGM-100MG4 hydraulic press. The microstructural characteristics of the cement paste were investigated using a Tescan Mira 3 scanning electron microscope. A NETZSCH STA 449 F1 Jupiter synchronous thermal analyzer was used to analyze the hydration products. Tests on fine-

Table 1. Particle size distribution of fine aggregates

Screening of crushed quartz sandstone						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	51.7	12.36	18.86	8.29	7.32	1.47
Total balances, %	51.7	64.06	82.92	91.21	98.53	100
Quartz sandstone						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	26.2	14.17	15.23	23.27	19.47	1.66
Total balances, %	26.2	40.37	55.6	78.87	98.34	100
Granite						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	42.31	16.72	13.24	9.28	17.31	1.14
	42.31	59.03	72.27	81.55	98.86	100

Table 2. Chemical composition of aggregates

Quartz sandstone											
Oxide content, % by mass											
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	P ₂ O ₅	S		
86,24	0,27	2,39	2,16	1.58	0.89	1.34	0.69	0.11	0.06		
Granite											
Oxide content, % by mass											
n/d	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S
0.24	3.82	1.57	15.59	63.57	4.65	2.90	0.62	0.094	6.31	0.21	0.03

Table 3. Setting kinetics of fine-grained concrete specimens under various temperature and humidity conditions

Filler	R_{bend} , MPa, within the specified time frame, months				R_{com} , MPa, within the specified time frame, months			
	1	3	6	12	1	3	6	12
	$20^\circ C$							
Screening of crushed quartz sandstone	4.04	5.04	10.2	13.98	34.46	40.5	40.37	39.07
Granite	2.52	9.48	8.47	10.2	37.73	46.21	43.44	54.66
Quartz sandstone	3.52	7.14	9.91	16.7	32.49	43.82	47.04	48.05
$80^\circ C$								
Screening of crushed quartz sandstone	7.36	8.32	11.03	12.39	27.2	29.71	39.21	46.7
Granite	2.1	13.36	12.78	16.33	29.0	36.0	38.98	38.7
Quartz sandstone	8.82	10.08	17.62	18.5	27.2	44.09	57.08	63.37

grained concrete specimens using the ultrasonic testing method were carried out on a “Pulsar 2.2” device. Fine-grained concrete specimens measuring 4 × 4 × 16 cm were subjected to ultrasonic testing throughout the entire test period (24 months) at a frequency of once a week.

RESEARCH RESULTS

The effect of aggregates on the thermal and moisture corrosion of concrete was investigated. The results of periodic determinations of the flexural and compressive strength of specimens after 1, 3, 6, and 12 months of curing are presented in Table 3. Specimens of fine-grained granite-based concrete, cured under normal conditions, demonstrated the highest strength, while when cured in water at 80 °C, higher strength values were obtained for specimens made from quartzite sandstone.

The data obtained show that, under conditions of hygrothermal curing, the filler plays an active role in the development of strength.

Based on the compressive strength data, the hygrothermal stability coefficient has been calculated (Table 4),

Table 4. Hygrothermal resistance coefficient

Filler	Time, months			
	1	3	6	12
Screening of crushed quartz sandstone	0.79	0.73	0.97	1.2
Granite	0.77	0.78	0.9	0.71
Quartz sandstone	0.84	1.01	1.21	1.32

which demonstrates the ratio of the compressive strength of specimens cured in water at 80 °C to the compressive strength at 20 °C: $K_{therm.res} = R_{com}^{80} / R_{com}^{20}$.

As can be seen from Table 4, the lowest durability coefficient was observed in the concrete specimens made with granite aggregate, indicating material degradation under prolonged hygrothermal exposure. The concrete specimens containing quartzite sandstone showed a steady increase in the hygrothermal resistance coefficient throughout the entire test period: from 0.84 (1 month) to 1.32 (12 months), indicating high structural resistance to hygrothermal effects.

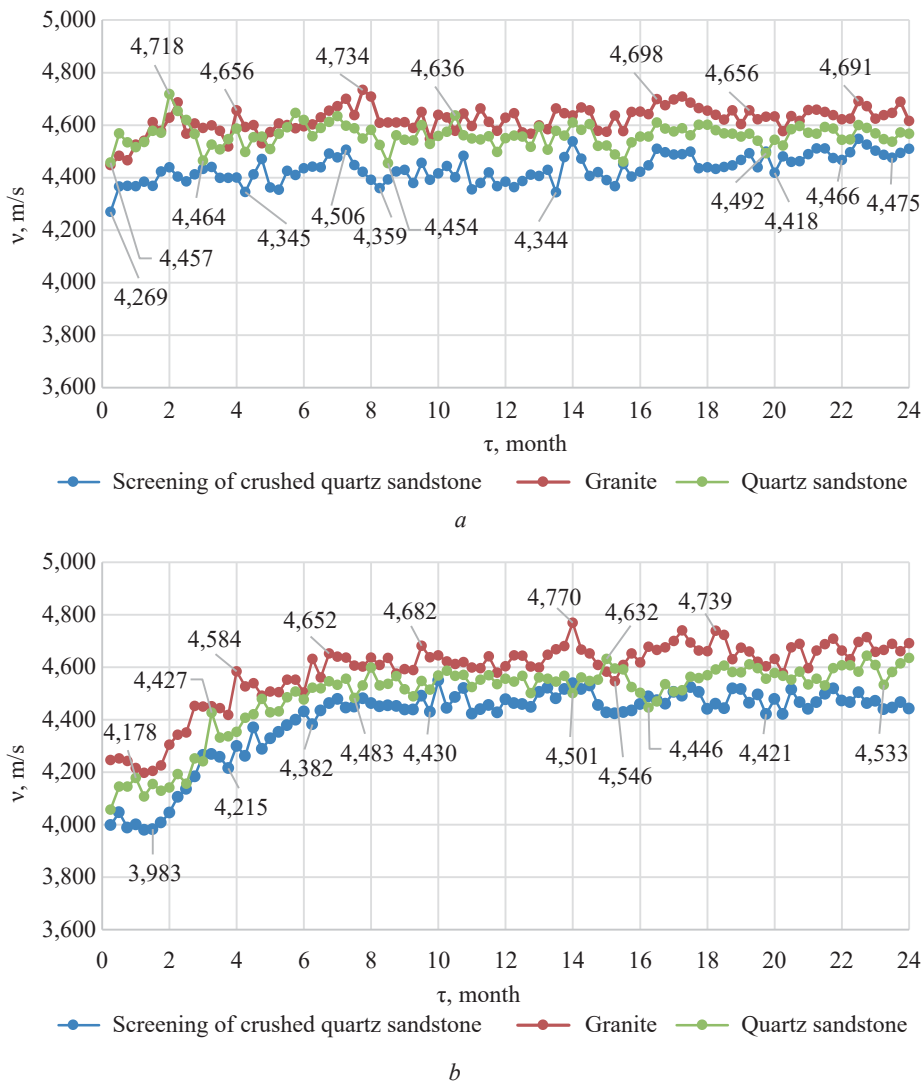


Fig. 1. Ultrasonic velocity in fine-grained concrete specimens (1:3) using various aggregates, set at temperatures of 20 °C (a) and 80 °C (b)

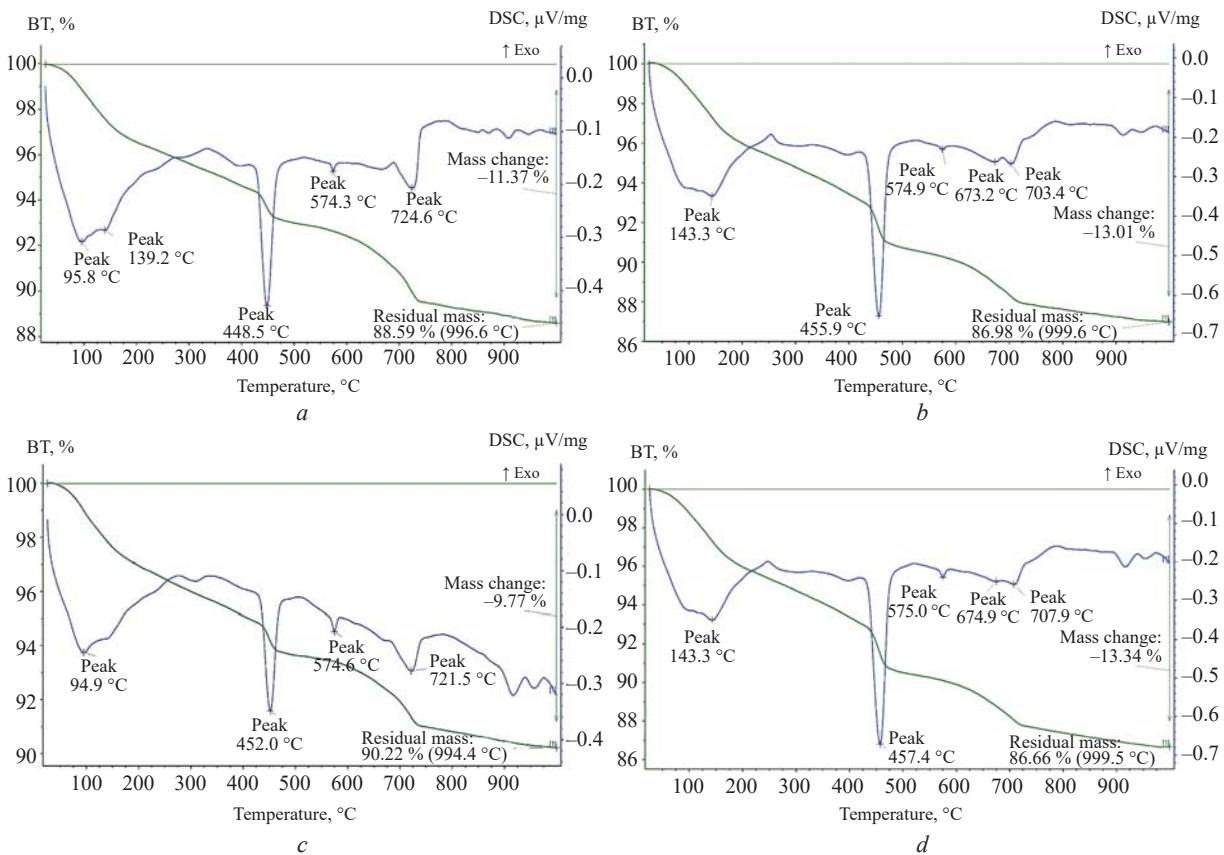


Fig. 2. Thermograms of the cement paste in fine-grained concrete cured at 20 °C. Aggregate: *a* — granite, 12 months; *b* — granite, 24 months; *c* — quartz sandstone, 12 months; *d* — quartz sandstone, 24 months

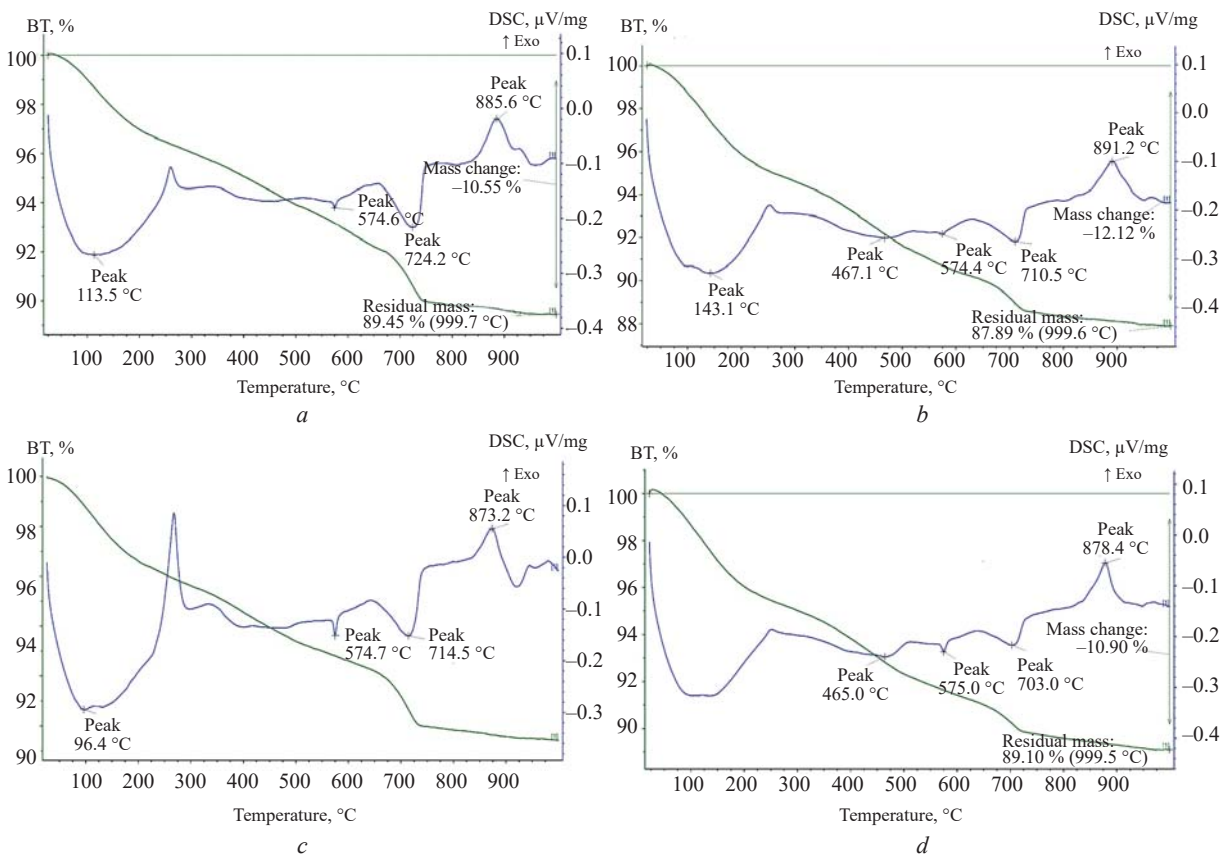


Fig. 3. Thermograms of the cement paste in fine-grained concrete cured at 80 °C. Aggregate: *a* — granite, 12 months; *b* — granite, 24 months; *c* — quartz sandstone, 12 months; *d* — quartz sandstone, 24 months

Ultrasonic diagnostics were used to continuously monitor the processes of concrete degradation. The rise and periodic decrease in the velocity of the ultrasonic pulse are correlated with recrystallisation phenomena. The velocity of the ultrasonic signal is an integral parameter characterizing the complex of structural and mechanical properties of the material (strength, porosity, crack formation, etc.). The results are shown in Fig. 1 and 2. According to monitoring data on the average velocity of the ultrasonic signal passing through specimens of fine-grained concrete cured in water at 80 °C, it was established that over the entire observation period, the increase in velocity amounted to + Δ 538 m/s for the quartz sandstone specimens and + Δ 471 m/s for the granite specimens. For specimens of all compositions, there is an intense increase in the ultrasonic signal velocity up to 8–10 months of immersion in hot water, after which stabilization occurs up to 24 months. This indicates that the destructive processes associated with the recrystallisation of hydrated phases proceed very slowly in all cases; no significant increase in porosity is observed. The similarity of the ultrasonic pulse velocity curves indicates that the processes of structural and phase formation are analogous.

The data presented show that the processes of phase and structure formation in fine-grained concrete specimens using various aggregates under hygrothermal conditions follow different patterns than those under normal curing conditions. The prolonged increase in the ultrasonic signal velocity in the specimens is due to the fact that quartz, feldspars and acidic micas, which are components of quartz sandstone and granite, undergo activation to varying degrees in a highly alkaline environment (with pH of 12–12.5). They actively interact with the calcium hydroxide present in the liquid phase of the concrete, forming calcium hydrosilicates and calcium hydrous aluminosilicates, which to varying degrees contribute to the densification of the cement matrix and the interface between the aggregate and the cement matrix of the concrete. According to thermodynamic calculations, the activity of quartz exceeds that of feldspar group minerals [23]. The results of this process are clearly evident from ultrasonic diagnostic data.

To investigate the phase formation processes in cement stone, specimens were prepared for differential thermal analysis (DTA) by drying the specimens in an oven and grinding them. The hydrated cement was separated from the aggregate by gentle grinding in a porcelain mortar. A small amount of ground aggregate remained in the cement specimen, despite careful sieving. Consequently, the thermographic analysis of these specimens is more reliable in terms of quality.

Similar thermal effects are observed in specimens of fine-grained concrete containing granite and quartz sandstone under normal curing conditions (20 °C). Endothermic effects persist for 12 months at 400–500 °C, associated with the decomposition of calcium hydroxide, and are more pronounced in the specimen containing granite. A double endothermic effect is

observed on the heating curve at temperatures of 95.8 and 139.2 °C, associated with the release of free water and the dehydration of highly basic products of the C-S-H, C-A-H and C-A-S-H types (Fig. 2). Weakly pronounced endothermic effects are observed at 575 °C, associated with the recrystallisation of quartz. Endothermic peaks are observed in the 640–750 °C range, associated with the dehydration of hydrosilicates of various compositions, which may overlap with the endothermic effects of the decomposition of calcite formed as a result of the carbonation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and dicalcium silicate. By 24 months, the intensity of these endothermic effects decreases. No exothermic effects are observed.

During the heat-moisture curing of fine-grained concrete specimens (80 °C), changes in thermal effects occur, indicating intense chemical reactions and the formation of new phases (Fig. 3). On the heating curve (particularly for the quartzite-sand mixture), an increase in the endothermic effect is observed in the range of 90–280 °C, which is explained by the high content of the C-S-H phase. After 12 months of curing, no calcium hydroxide effect is detected on the thermograms of either composition. At the same time, an exothermic effect is recorded at a temperature of 860–900 °C, indicating the presence of CSH(B)-type hydrosilicates. Endothermic effects at 720 °C are characteristic of low-basic hydrosilicates (gyrolite $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$), which are combined with endothermic effects of calcite decomposition. The main changes in the 12–24-month interval include a decrease in the intensity of endothermic effects at temperatures of 640–750 °C. This indicates that the maximum phase changes in the cement stone, which began at the initial stage of hardening and continued for up to one year, then transition into a phase of slow transformation.

The authors conducted electron microscopic studies of specimens of fine-grained concrete containing granite and quartz sandstone aggregate, which had cured for 12 months under standard conditions; these studies showed that the microstructure of the cement paste was fairly similar in both cases (Fig. 4). A more or less uniform distribution of fibrous, clearly distinguishable crystals of highly basic calcium hydrosilicates is observed within the cement matrix structure, which has a positive effect on strength. The continuous growth of well-formed fibres of highly basic calcium hydrosilicates indicates the development of ageing processes in the cement stone hardening in water over a long period. After one year of normal hardening, the C_2SH_2 crystals increase in size to 2–3 μm , forming strong intergrowths with the portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Fig. 4).

During prolonged curing (one year) of fine-grained concrete specimens in water at 80 °C, there is an increase in the proportion of well-crystallized particles (Fig. 5) relative to the gel-like matrix. Well-defined fibrous crystals of 0.5–1 μm are formed, often in the form of agglomerates, with transitional gel-like zones between them. Polycrystalline regions are observed in the form of chaotically arranged large plate-like crystals of calcium hydrosilicates, which increases the degree of structural heterogeneity

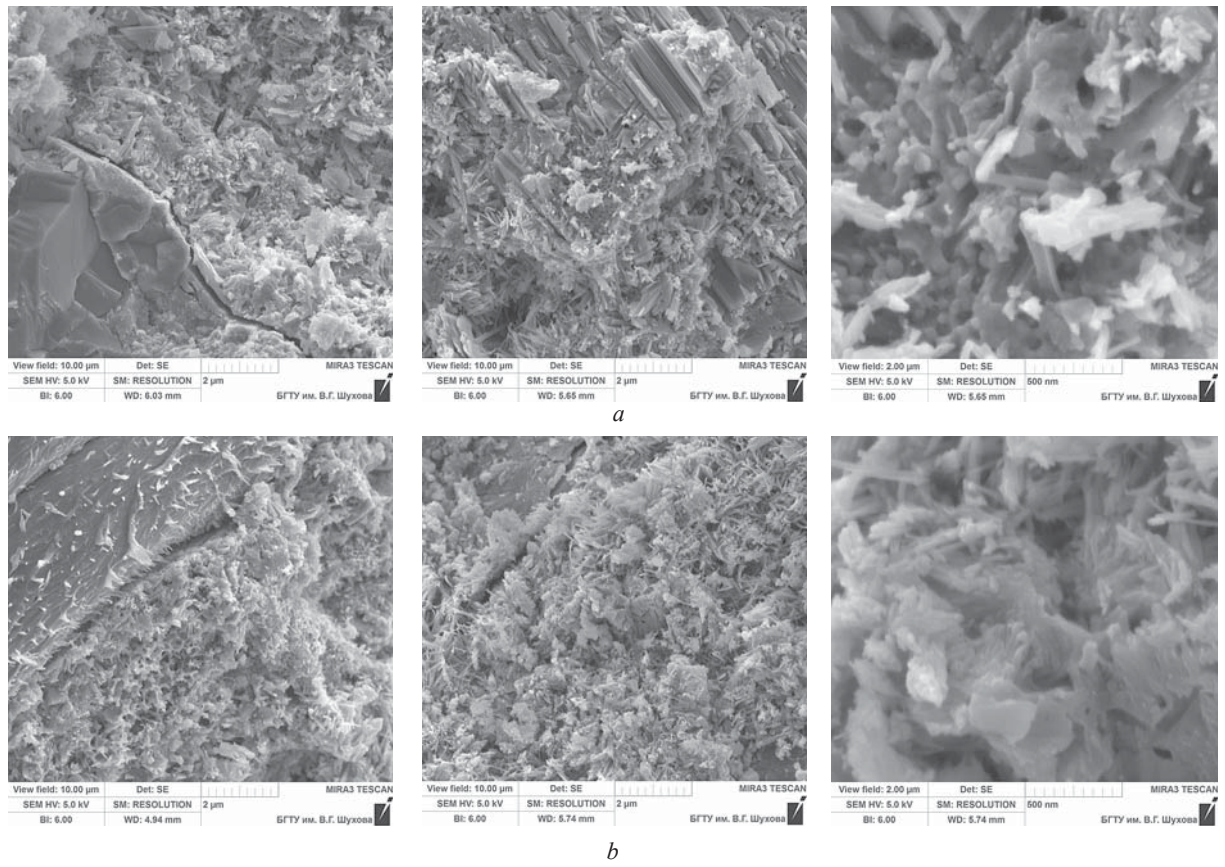


Fig. 4. Microstructure of the cementitious matrix of concrete, calcium silicate hydrates, 12 months, 20 °C: *a* — granite aggregate; *b* — quartz sandstone

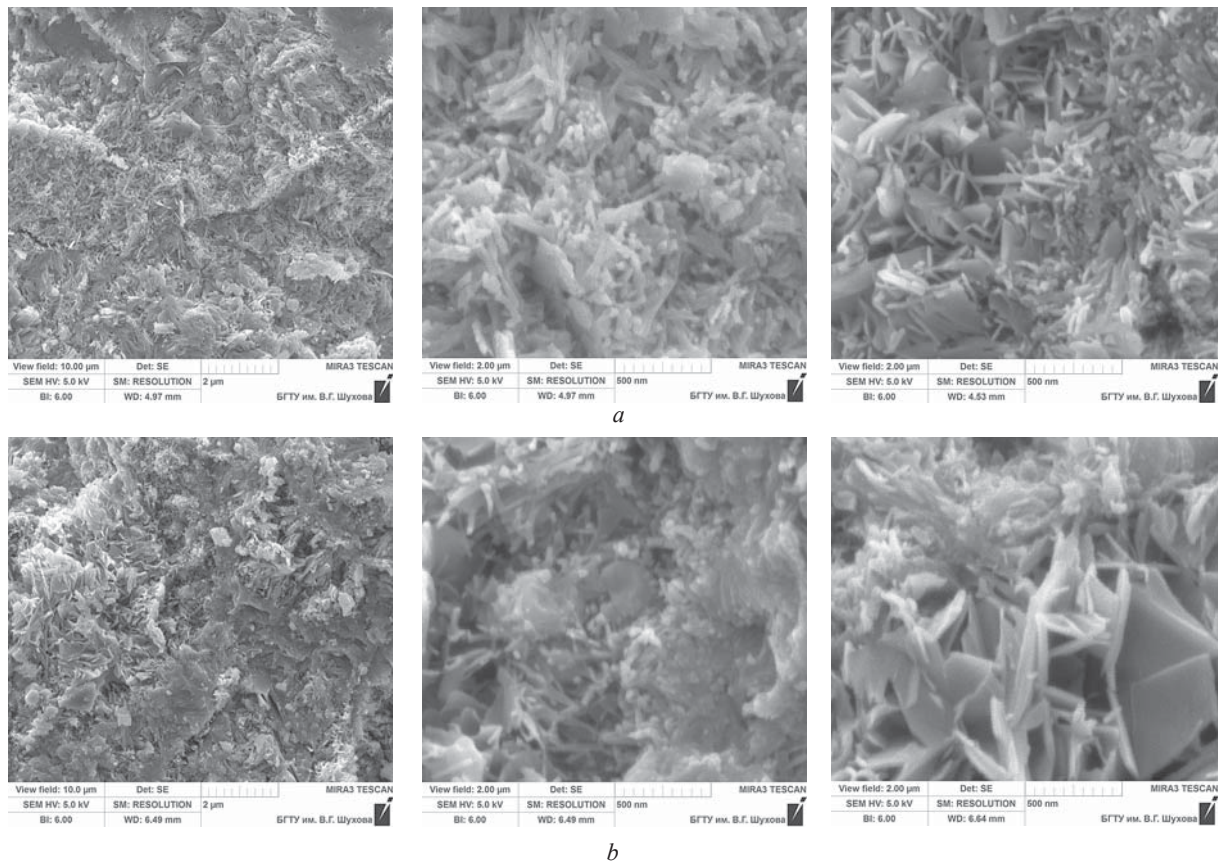


Fig. 5. Microstructure of the cementitious matrix of concrete, calcium silicate hydrates, 12 months, 80 °C: *a* — granite aggregate; *b* — quartz sandstone

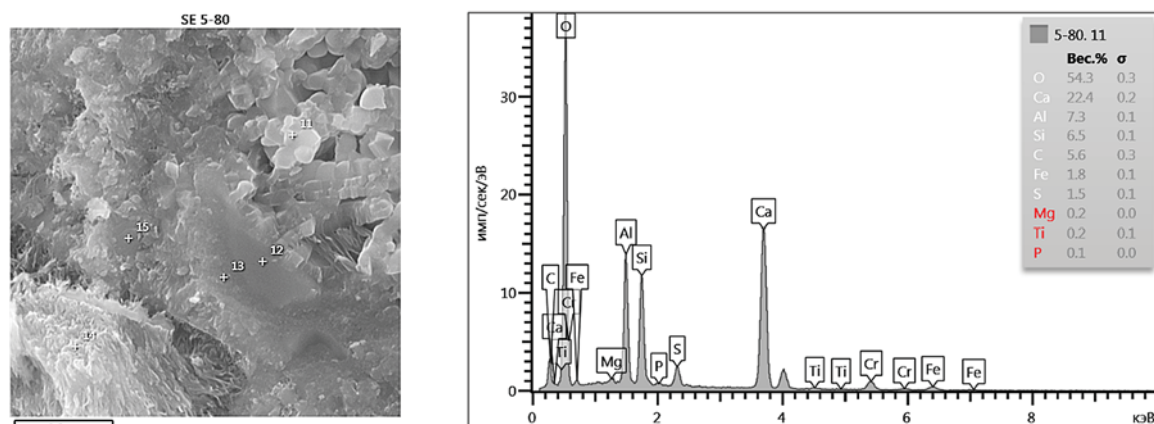


Fig. 6. Microstructure of the cement matrix in granite-based concrete, hydrogranite, 24 months, 80 °C

ity. The organizational structure of the cement stone is determined by the ordered structure in individual microregions. The crystallization of large polycrystalline aggregates, when unevenly distributed within the structure of the hydrosilicate gel, is undesirable, as it often leads to destructive phenomena. As the setting time increases, the degree of crystallinity of the new formations rises, both under hygrothermal and normal setting conditions.

Due to the high aluminium content in granite, during prolonged solidification under thermal and humid conditions, it is predominantly incorporated into hydrogarnets which, despite their stability, can reduce strength by increasing structural heterogeneity (Fig. 6).

CONCLUSION AND DISCUSSION

It has been established that aggregates made of granite and quartz sandstone improve the thermal stability of fine-grained concrete. The highest coefficient of hygrothermal resistance was observed in specimens containing quartzite sandstone ($K_{therm.res}^{12} = 1.20-1.3$) compared to those containing granite ($K_{therm.res}^{12} = 0.71$). This is due to the increased lime absorption activity of quartz sandstone compared to granite aggregate, which contributes to the formation of thermodynamically stable hardening products under conditions of elevated humidity and temperature.

The steady increase in the ultrasonic signal velocity through specimens of fine-grained concrete cured in water at 80 °C indicates that the destructive processes associated with the recrystallisation of hydrate phases proceed very slowly in both cases. At the same time, chemical processes on the surface of the fine aggregate grains lead to increased bonding between them and the cement matrix, which enhances the strength of the concrete.

The phase formation processes in the cement matrix of fine-grained concrete under elevated temperature and humidity conditions follow different patterns than those under normal setting conditions. The hydrated phases of the cement paste, primarily $Ca(OH)_2$, actively undergo chemical reactions with the minerals of fine aggregates at elevated temperatures, forming thermally stable, low-basic calcium hydrosilicates CSH(B), identifiable by an exothermic effect at 860–900 °C. During hardening under normal conditions, free lime is practically not bound. The main component of the cement paste is dibasic calcium hydrosilicate. Changes in the phase composition of the cement matrix in concrete made from quartzite sandstone and granite are quite similar.

The results obtained are of significant practical importance and allow quartz sandstone to be considered a valuable raw material for the production of concrete resistant to hygrothermal corrosion.

REFERENCES

- Chen J., Li Y., Li Y., Wen L., Guo H. Effects of curing conditions with different temperature and humidity on damage evolution of concrete during freeze-thaw cycling. *Materials and Structures*. 2022; 55(2). DOI: 10.1617/s11527-022-01921-z
- Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013; 61(1):145-154. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
- Nishi H., Kasami H., Tayama T. Effects of mix proportion on the strength and elasticity of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C. *Key Engineering Materials*. 2016; 711:472-479. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.472
- Leonovich S., Zaytsev Yu., Dorkin V., Litvinovskiy D. *Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and humidity effects*. Moscow, INFRA-M, 2018; 258. DOI: 10.12737/monography_59c9f9b9c34210.46897590. EDN ZVYZWH. (rus.)
- Istomin A.D., Petrova V.A. Effect of negative temperatures on the strength and deformability of a reinforced concrete element. *Reinforced Concrete*

Structures. 2023; 4(4):3-12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.3-12. EDN QDOYLQ. (rus.).

6. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O. A., Balakireva V.V. Operation and destruction of concrete at high and low temperatures. *Construction Materials*. 2019; 3:64-67. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66. EDN ZIKFHV. (rus.).

7. Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A. Destruction viscosity of high-strength concrete after high temperature impact. *Construction Materials*. 2017; 11:12-17. EDN ZWUFVV. (rus.).

8. Nizina T.A., Korovkin D.I., Balykov A.S., Volodin V.V. Analysis of changes in the elastic-strength characteristics of modified and unmodified fine-grained concretes depending on their wet state and test temperature. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(1):(34):71-78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12. EDN JSFUJO. (rus.).

9. Slavcheva G.S., Kim L.V. Mechanisms and relationships of strength changes of concretes relating to its temperature-moisture state. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2015; 1(22):63-70. EDN TNULPV. (rus.).

10. Borush O.V., Grigorieva O.K. *General power engineering. Power plants : tutorial*. Novosibirsk, NSTU, 2017; 96. EDN VULPMT. (rus.).

11. Ryabova L.I. High-quality cement slurries. *Drilling and Oil*. 2003; 1:30-31. EDN ORCJWF. (rus.).

12. Tolypina N.M., Chashin D.Y. Degradation of cement stone under conditions of elevated temperature and humidity. *Vestnik GSTU. Technical sciences*. 2024; 20(3):(37):109-117. EDN TORVVO. (rus.).

13. Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method. *Journal of Building Engineering*. 2022; 57:104906. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104906

14. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5597918

15. Tolypina N.M., Hahaleva E.N., Danilov D.Yu., Chashin D.Yu. The effect of micro-fillers on the effectiveness of superplasticizers and the strength of low-cement concretes. *Bulletin of Belgorod State Techno-*

logical University named after V.G. Shukhov. 2023; 8:8-15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15. EDN KBXBJU.(rus.).

16. Kodur V.K. R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021; 23(6):793-801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225

17. Kamalova Z.A., Smirnov D.S. Research and development of measures for the restoration of concrete structures of cooling towers. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2011; 4(18):233-237. EDN OKGCUH. (rus.).

18. Mazur V., Kutsenko T., Petrov S. The choice of a rational method for repairing monolithic reinforced concrete shells of cooling towers, taking into account the possibility of using different means of scaffolding. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020; 6(146):11-18. EDN FCPRGC. (rus.).

19. Kalatuzov V.A., Moshkarin A.V. Modern principles of technical re-equipment of technical water supply systems of thermal power plants. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2008; 2:41-45. EDN PFJMFJ. (rus.).

20. Vasilevskaya L., Zyuzin R. Diversion tunnels technical assessment based on the example of Khrami HPP II. *The Hydrotechnika*. 2019; 1(54):10-15. EDN FSOGSH. (rus.).

21. Kalatuzov V.A. Problems of ensuring the reliability of reinforced concrete exhaust towers of cooling towers. *Energo-INFO*. 2009; 10(33).

22. Tolypina N.M., Rakhimbaev Sh.M., Chashin D.Yu. Thermal stability of cement systems with active mineral additives. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(2):291-305. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305. EDN CHCWNF.(rus.).

23. Rakhimbaev I.Sh., Tolypina N.M. Thermodynamic calculation of activity in an alkaline environment of minerals included in the composition of concrete fillers. *Scientific and engineering problems of construction and technological utilization of man-made waste*. 2014; 13:174-178. EDN SCUPXV. (rus.).

Received December 9, 2025.

Adopted in revised form on January 19, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: **Natalia M. Tolypina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

Elena N. Khakhaleva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant to the Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4868-2181; HahalevaEN@mgsu.ru;

Dmitriy Yu. Chashin — postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriy-chashin11@gmail.com;

Daniil A. Tolypin — postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; tolypin.daniil@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.