




Научная статья / Original Article

УДК 691.335

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-697-714>

CC BY 4.0

Экспериментальные исследования бетонных материалов для восстановления конструкций гидротехнических сооружений

Карлыгаш Идрисовна Ильясова¹ , Жангазы Нуржанович Молдамуратов^{1,2} ,
Оразалы Дауткалиевич Сейтказинов^{1,2} , Гулдана Солтановна Абиева^{1,2*} ,
Айнур Зокировна Тухтамишева^{1,2*} , Манижа Пактин¹ 

¹ Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

² Казахская головная архитектурно-строительная академия, Алматы, Казахстан

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: g.abieva@kazgasa.kz, aynurjan_kz@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования являлось обоснование применения современных бетонных материалов для восстановления конструкций гидротехнических сооружений в условиях Казахстана и Центральной Азии, где эксплуатация осложнена резкими климатическими перепадами, сульфатно-хлоридной агрессией и сейсмической активностью. Актуальность работы определяется высокой степенью износа действующих сооружений и недостаточной эффективностью традиционных методов ремонта. **Методы и материалы.** Для оценки свойств исходного бетона и перспективных ремонтных составов (полимермодифицированные растворы, геополимерные системы и ультравысокопрочный бетон – УНПС) проведён комплекс лабораторных испытаний. Исследования включали физико-механические тесты (прочность, модуль упругости, адгезия), долговечностные испытания (RCPT, NT Build 492, морозостойкость, сульфатная стойкость, абразивно-кавиционный износ) и анализ микро- и наноструктуры (SEM/EDS, XRD, наноиндентация). **Результаты и обсуждение.** Исходный бетон показал высокую проницаемость (~5,2 тыс. Кл по RCPT), низкую адгезию и значительные потери прочности при циклировании, что объясняется выраженной пористостью и трещиноватостью структуры. УНПС продемонстрировал минимальную проницаемость (<0,3 тыс. Кл), высокую адгезию (2,2 МПа), низкие потери прочности при морозных циклах (≤3%) и максимальные значения локального модуля упругости (40–50 ГПа). Геополимерные материалы обеспечили стойкость к сульфатной агрессии (расширение ≤0,038%) и мелкопористую структуру с низким коэффициентом диффузии ($5 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$), полимермодифицированные растворы (ПММ) показали промежуточные характеристики, оставаясь экономически более доступным решением. SEM подтвердил значительное уплотнение структуры УНПС и геополимеров по сравнению с исходным бетоном; XRD выявил снижение содержания портландита и образование сульфатостойких фаз у геополимеров, а у УНПС – преобладание аморфного C–S–H. **Заключение.** Комплексный анализ показал, что рациональность применения материалов определяется сочетанием эксплуатационной долговечности, надёжности и экономико-экологических показателей. УНПС следует рекомендовать для зон с интенсивной кавитацией и абразией, геополимеры – для сооружений в сульфатных средах, а ПММ – для локальных ремонтных работ в условиях ограниченного бюджета. Результаты исследования подтверждают эффективность многоуровневого подхода: диагностика → выбор материала → лабораторная верификация → прогноз долговечности → практические рекомендации. Это обеспечивает научно обоснованную основу для проектирования восстановительных мероприятий гидротехнических сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микро- и наноструктура, бетонные конструкции, гидротехнические сооружения, ультравысокопрочный бетон, геополимер, полимермодифицированные растворы

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP23487624.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ильясова К.И., Молдамуратов Ж.Н., Сейтказинов О.Д., Абиева Г.С., Тухтамишева А.З., Пактин М. Экспериментальные исследования бетонных материалов для восстановления конструкций гидротехнических сооружений. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):697–714. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-697-714>. – EDN: OBIJOJ.

Experimental studies of concrete materials for the restoration of hydraulic structures

Karlygash I. Ilyassova¹ , Zhangazy N. Moldamuratov^{1,2} , Orazaly D. Seitkazinov^{1,2} ,
Guldana S. Abiyeva^{1,2*} , Ainur Z. Tukhtamisheva^{1,2*} , Manizha Paktin¹ 

¹ International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author: e-mail: g.abieva@kazgasa.kz, aynurjan_kz@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The objective of this research is to substantiate the application of advanced concrete materials for restoring hydraulic structures in Kazakhstan and Central Asia, where service conditions are severe due to sharp temperature swings, sulfate-chloride attack, and high seismicity. The relevance of the study is determined by the widespread deterioration of existing infrastructure and the demonstrated inadequacy of traditional repair methods. **Methods and materials.** To evaluate the properties of the original concrete and promising repair materials (polymer-modified mortars, geopolymer systems, and ultra-high-performance concrete-UHPC), a comprehensive set of laboratory tests was conducted. The research included: physico-mechanical tests (strength, elastic modulus, adhesion), durability tests (RCPT, NT Build 492, freeze-thaw resistance, sulfate resistance, abrasion-cavitation wear), and micro/nanostructural analysis (SEM/EDS, XRD, nanoindentation). **Results and discussion.** The original concrete exhibited high permeability (~5.2 thousand C according to RCPT), low adhesion, and significant strength loss under cyclic loading, which can be explained by pronounced porosity and cracking of the structure. UHPC demonstrated minimal permeability (<0.3 thousand C), high adhesion (2.2 MPa), low strength loss under freeze-thaw cycles ($\leq 3\%$), and the highest local elastic modulus (40–50 GPa). Geopolymer materials showed strong sulfate resistance (expansion $\leq 0.038\%$) and a fine-pore structure with a low diffusion coefficient ($5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Polymer-modified mortars (PMM) exhibited intermediate characteristics, remaining the most economically feasible option. SEM confirmed the significant densification of the UHPC and geopolymer matrices compared to the original concrete; XRD revealed a reduction in portlandite content and the formation of sulfate-resistant phases in geopolymers, while UHPC showed a predominance of amorphous C–S–H phases. Conclusion. The comprehensive analysis demonstrated that the rational use of materials depends on the balance between durability, reliability, and economic–environmental indicators. UHPC is recommended for zones exposed to intensive cavitation and abrasion; geopolymers are optimal for structures in sulfate environments; and PMM are suitable for localized repairs under budget constraints. The results confirm the effectiveness of a multi-level approach: diagnostics → material selection → laboratory verification → durability prediction → practical recommendations. This provides a scientifically grounded basis for designing restoration measures for hydraulic structures.

KEYWORDS: micro- and nanostructure, concrete structures, hydraulic structures, ultra-high-performance concrete (UHPC), geopolymer, polymer-modified mortars

ACKNOWLEDGMENTS: This research was carried out with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the scientific project No. AP23487624.

FOR CITATION:

Ilyassova K.I., Moldamuratov Zh.N., Seitkazinov O.D., Abiyeva G.S., Tukhtamisheva A.Z., Paktin M. Experimental studies of concrete materials for the restoration of hydraulic structures. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(6):697–714. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-697-714>. – EDN: OBJOJ.

ВВЕДЕНИЕ

Бетонные гидротехнические сооружения (ГТС) являются основой устойчивого водопользования. Они обеспечивают регулирование речного стока, ирригацию, водоснабжение городов, выработку электроэнергии и защиту от паводков [1, 4, 5].

Надежность и долговечность этих сооружений напрямую влияют на социально-экономическое развитие стран. В Казахстане и странах Центральной Азии большинство бетонных ГТС были построены

в 1960–1980-х годах. Их расчетный срок службы составляет 40–50 лет. Сегодня значительная часть этих сооружений эксплуатируется с превышением нормативного ресурса. По данным Министерства экологии и водных ресурсов РК, более 60% водохозяйственных сооружений нуждаются в ремонте или реконструкции. В Узбекистане и Кыргызстане аналогичные показатели достигают 55–65% [2, 3, 6, 7].

В странах Центральной Азии эксплуатация бетонных гидротехнических сооружений осложняется совокупностью природных и техногенных факто-

ров. Резкие перепады температур, многократные циклы замораживания и оттаивания, а также высокая солнечная радиация ускоряют деградацию бетона. Засоленные подземные воды Приуралья и низовьев Сырдарьи вызывают хлоридную и сульфатную коррозию, что приводит к потере защитных свойств бетона и арматуры. В сейсмоопасных зонах Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана динамические нагрузки способствуют образованию трещин и снижению сцепления арматуры с бетоном. Старые каналы и водосбросы эксплуатируются в условиях перегрузок из-за увеличения населения и потребностей сельского хозяйства. Традиционные методы ремонта, такие как цементные инъекции и торкретбетон, дают лишь кратковременный эффект. Ограниченное финансирование дополнительно сдерживает применение долговечных технологий восстановления [1–4, 10, 11].

Международный опыт указывает на шесть ключевых проблем бетонных ГТС: карбонизация и потеря защитных свойств бетона, коррозия арматуры под действием хлоридов, сульфатная агрессия при минерализованных водах, кавитация и абразия в высоконапорных водосбросах, морозное разрушение в условиях континентального климата, а также щелочно-кремнеземная реакция, характерная для бетонов с местными заполнителями (табл. 1).

В Центральной Азии к этому добавляются: сейсмические риски, высокая минерализация воды, большие колебания уровня водохранилищ.

В настоящее время учеными разных стран [13–18] исследуются новые материалы и подходы: ультравысокопрочные бетоны (UHPC), полимермодифицированные растворы, геополимерные составы, методы катодной защиты и цифрового мониторинга. Однако их внедрение в странах региона ограничено недостатком научно обоснованных методик и адаптации к местным условиям [19, 20].

В мировой практике накоплен значительный опыт по восстановлению бетонных гидротехнических сооружений, направленный на продление срока службы, снижение рисков отказа и повышение устойчивости к агрессивным воздействиям. Современные подходы базируются на сочетании инженерных технологий, новых материалов и цифрового мониторинга [12, 21, 22].

Диагностика дефектов активно развивается за счет применения неразрушающих методов контроля, таких как ультразвуковое тестирование, георадарное зондирование, инфракрасная термография и акустическая эмиссия. Широкое распространение получили беспилотные летательные аппараты с лидарными системами, а также цифровые двойники и BIM-модели, позволяющие интегрировать результаты мониторинга в единую информационную среду. В США и странах ЕС внедряются сенсорные системы для контроля влажности, коррозионного состояния арматуры и раскрытия трещин [23, 24].

Методы восстановления включают торкретирование для укрепления облицовок каналов и водосбросов, инъекционные технологии с использованием эпоксидных смол, полиуретанов и микроцементов для герметизации трещин, футеровку высокопрочными бетонами (UHPC, RCC), а также применение полимерных мембран и композитов. Усиление конструкций осуществляется с помощью FRP-систем, карбоновых и стеклопластиковых материалов, а также текстильных армирующих матриц (TRM). Для защиты арматуры используются катодная защита и электрохимическое удаление хлоридов. Все большее распространение находят геополимерные материалы и вторичные минеральные добавки (золы-уноса, сталеплавильные шлаки), которые обеспечивают как экологичность, так и повышенную стойкость к сульфатной агрессии (табл. 2) [25, 26].

Таблица 1. Основные дефекты бетонных гидротехнических сооружений в Центральной Азии

№	Дефект	Причина	Особенности региона	Последствия
1	Карбонизация	Диффузия CO ₂	Высокая солнечная радиация, сухой климат	Потеря защитного слоя
2	Хлоридная коррозия	Засоленные воды	Приаралье, низовья Сырдарьи	Потеря арматуры
3	Сульфатная коррозия	Минерализованные воды	Южный Казахстан, Ферганская долина	Образование этtringита, трещины
4	Морозное разрушение	Замораживание-оттаивание	Северный и Восточный Казахстан	Отшелушивание бетона
5	Кавитация и абразия	Высокие скорости потока	Водоводы и водосбросы Чарынской и Шардаринской ГЭС	Выбоины, эрозия
6	Сейсмические трещины	Динамические нагрузки	Алматы, Бишкек, Душанбе	Потеря целостности

Таблица 2. Международные технологии восстановления бетонных ГТС

№	Технология	Применение	Преимущества	Недостатки
1	Торкретбетон	Облицовка каналов, плотин	Быстрота, доступность	Краткосрочный эффект (10–15 лет)
2	Инъекции (эпоксид, ПУ, микроцементы)	Трещины, швы	Восстановление герметичности	Сложность контроля качества
3	UHPC, RCC	Футеровка, облицовка	Высокая долговечность (> 50 лет)	Высокая стоимость
4	FRP, TRM	Усиление конструкций	Легкость, коррозионная стойкость	Ограниченный опыт применения в ГТС
5	Геополимеры	Замена цемента	Экологичность, стойкость к сульфатам	Ограниченные нормативы
6	Катодная защита	Защита арматуры	Эффективность до 30 лет	Дороговизна и обслуживание

Практические примеры подтверждают эффективность указанных технологий. В Норвегии и Канаде для восстановления плотин применяются геополимерные растворы с низкой теплотой гидратации, что снижает риск термических трещин. В Китае и Японии активно внедряются ультравысокопрочные бетоны для футеровки водосбросов и каналов, обеспечивающие срок службы более 50 лет. В США Корпус инженеров армии использует системы катодной защиты и электрохимической десалинции, позволяющие увеличить ресурс сооружений на 20–30 лет. В странах ЕС применяется многоуровневая схема «диагностика–ремонт–мониторинг», в рамках

которой цифровые двойники конструкций обновляются в режиме реального времени (рис. 1) [27, 28].

Основными тенденциями международной практики являются переход от локальных ремонтов к комплексной реконструкции, внедрение экологически устойчивых материалов и технологий с учетом показателей жизненного цикла, активное использование цифровых инструментов мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса, а также многофакторная оптимизация решений по критериям «стоимость–надежность–экология» [25–30].

Мировой опыт показывает, что долговечность ремонта достигается при интеграции современных

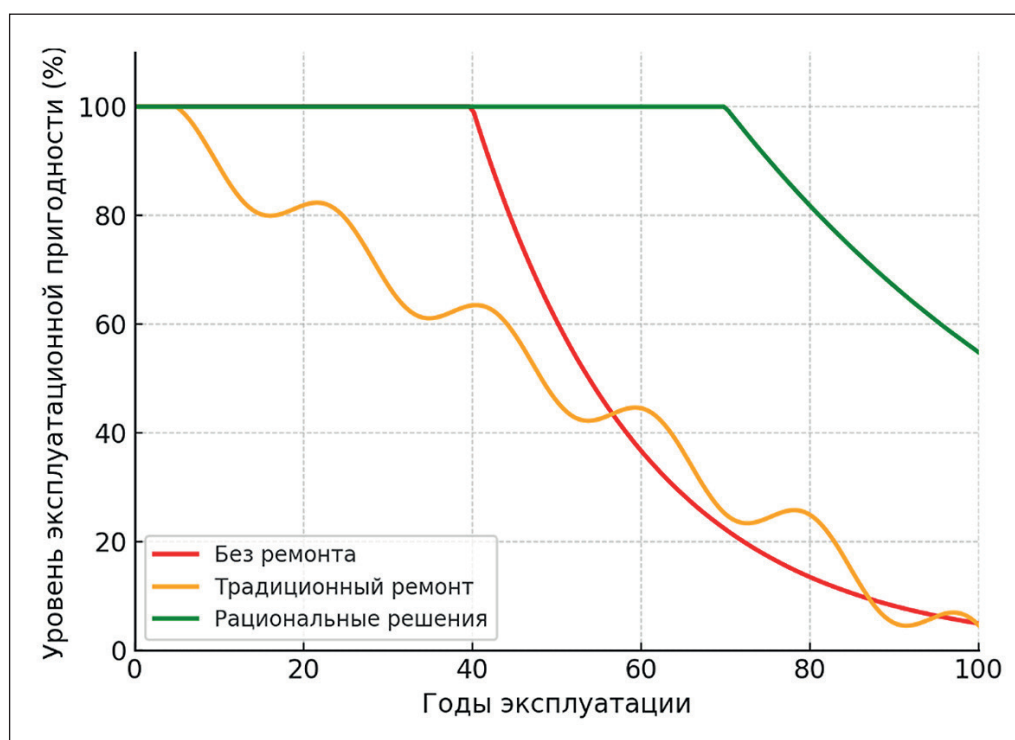


Рис. 1. Жизненный цикл бетонных ГТС

материалов, инновационных технологий и цифрового мониторинга. Для условий Центральной Азии актуальной задачей является адаптация этих практик с учетом климатических, сейсмических и гидрогеологических особенностей региона [26–29].

Основная научная проблема – отсутствие системного подхода к обоснованию рациональных технических решений, которые учитывают специфику дефектов, климатические факторы, экономические ограничения и требования долговечности.

Цель исследования – обоснование рациональных технических решений по восстановлению эксплуатационной пригодности бетонных конструкций гидротехнических сооружений Казахстана и Центральной Азии.

Задачи исследования:

- провести систематизацию дефектов и факторов их возникновения в условиях региона;
- разработать комплексную методику диагностики бетонных ГТС;
- исследовать свойства современных ремонтных материалов в агрессивных средах Центральной Азии;
- смоделировать поведение конструкций с учетом климатических и сейсмических факторов;
- выполнить многофакторную оценку рациональности решений по критериям: долговечность, надежность, экономика и экология;
- сформировать рекомендации для практического применения при ремонте и реконструкции ГТС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Материалы и серии образцов [13–22].

Исследовались четыре системы, представляющие практические решения для ремонта ГТС: контрольные керны, полимермодифицированный раствор

(ПММ), ультравысокопрочный бетон (УНРС) и геополлимерный состав (ГП). Составы и целевые характеристики суммированы в табл. 3.

Образцы формовались в цилиндрах $\varnothing 100 \times 200$ мм и кубах $100 \times 100 \times 100$ мм; для модульных испытаний использовались призмы $100 \times 100 \times 400$ мм. Выдерживание – 28 суток при 20 ± 2 °C и $RH \geq 95\%$. Перед испытаниями торцы шлифовались/каппировались.

2. Кондиционирование [26].

Режимы подготовки под конкретные методы приведены в табл. 5. Для NT Build 492 применялось вакуум-насыщение (50 кПа, 1 ч) и выдерживание в воде 23 °C (24 ч). Для RCPT выполнялось насыщение по ASTM C1202 (24 ч). Для сорбции (ASTM C1585) образцы сушили до стабилизации массы при 50 °C, затем проводили торцевое насыщение. Морозостойкость испытывали по режимам А/В (–18...+4 °C) до 300 циклов; сульфатную стойкость – в растворах $Na_2SO_4/MgSO_4$ (50 г/л) при 23 °C в течение 6–12 месяцев. Упрощенный план-график на первые 120 суток показан на рис. 2.

3. Физико-механические испытания [17, 21, 27].

Прочность при сжатии определялась по ASTM C39/EN 12390–3 на цилиндрах $\varnothing 100 \times 200$ мм и кернах; модуль упругости – по ASTM C469/EN 12390–13 на призмах с тензометрическим контролем деформаций. Водопоглощение (ASTM C642) и капиллярная сорбция (ASTM C1585) использовались для оценки транспортных свойств; целевой показатель для ремонтных составов – $k_{сорп} \leq 0,10 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5}$. План числа образцов по видам испытаний дан на рис. 3.

4. Проницаемость и миграция [13–15].

Ионная проницаемость оценивалась RCPT (ASTM C1202, 6 ч, 60 В; целевое <1000 Кл), а диффузионные характеристики – миграционным тестом NT Build 492 с расчетом $D_{nssm} \leq 8 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ для лучших систем. Диски $\varnothing 100 \times 50$ мм готовили из тех же

Таблица 3. Составы и целевые характеристики систем

№	Система	Связующее	Заполнитель/ фракция	d_{max} , мм	w/b или M_s	Полимер р/с, %	Фибра, % об.	Добавки	Целевая f_c , МПа	Модуль E, ГПа	Примечания
1	Контрольные керны	Портланд-цемент (из конструкции)	Щебень/песок, до 20 мм	20	–	–	–	–	30–40 (факт)	25–32	Базовая линия
2	ПММ-раствор	Портланд-цемент + полимерная дисперсия	Кварцевый песок 0–2 мм	2	w/c = 0,35	7	0	СП 0,6–1,0%	40–80	25–35	Низкая усадка
3	УНРС	РС + микрокремнезём + зола/шлаки	Кварцевая мука + песок 0–1 мм	1	w/b = 0,18–0,20	–	2 (стальная)	СП 1,0–1,5%	≥ 150	40–50	Повышенная износостойкость
4	Геополлимер (ГП)	Зола-уноса + BOFS, щелочной активатор	Песок 0–2 мм	2	$M_s = 1,4$; LA = 10%	–	0–0,5 (опц.)	Пластификатор 0,5–0,8%	60–90	28–38	Стойкость к сульфатам

Таблица 4. План испытаний и стандарты

№	Испытание	Стандарт/ссылка	Тип/размер образца	n на систему	Выходной параметр
1	Прочность при сжатии	ASTM C39 / EN 12390-3	Цилиндр Ø100×200 мм	6	f_c (МПа)
2	Модуль упругости	ASTM C469 / EN 12390-13	Призма 100×100×400 мм	6	E (ГПа)
3	Сорбция	ASTM C1585	Диск/куб (торцевое насыщение)	6	$k_{\text{сорп}}$ (кг/м ² ·h ^{0,5})
4	Водопоглощение	ASTM C642	Куб 100×100×100 мм	6	Abs (%)
5	RCPT (проницаемость)	ASTM C1202	Диск Ø100×50 мм	6	Заряд (Кл)
6	Миграция (D_d)	NT Build 492	Диск Ø100×50 мм	6	$D_{\text{нssm}}$ (м ² /с)
7	Морозостойкость	ASTM C666 / CDF RILEM	Призма/куб	6	$\Delta m, \Delta E_{\text{дин}}, \Delta f_c$
8	Сульфатная стойкость	ASTM C1012	Призм. образец	6	Расширение (%)
9	Абразия	ASTM C1138	Пластина/куб	6	Потеря массы (г/м ² ·ч)
10	Кавитация	ASTM G32	Пластина/куб	6	Износ (мг/мин)
11	Micro-CT	Внутр. регламент	Куб/кern	3	Пористость, связность, трещины
12	SEM/EDS	Внутр. регламент	Шлиф	3	ITZ, Ca/Si, Cl, S
13	XRD	Внутр. регламент	Порошок	3	Фазовый состав
14	TG/DSC	Внутр. регламент	Порошок	3	СН, карбонаты, гидраты
15	Наноиндентация	ISO 14577 (подход)	Шлиф	3	E, H локальные

Таблица 5. Кондиционирование и подготовка образцов

№	Этап	Режим	Длительность	Образцы
1	Твердение	20±2 °C; RH≥95 %	28 сут	Все системы
2	Подготовка торцов	Шлифовка/каппирование	До испытаний	Сжатие, модуль
3	Вакуум-насыщение	50 кПа, 1 ч; выдержка 23 °C, 24 ч	Перед NT492	Диски Ø100×50
4	RCPT кондиционирование	Насыщение по ASTM C1202	24 ч	Диски Ø100×50
5	Сорбция	Сушка 50 °C до $m_{\text{стаб}}$ → торцевое насыщение	По C1585	Диски/кубы
6	Мороз	Режим А/В; –18...+4 °C	до 300 циклов	Призмы/кубы
7	Сульфаты	Na ₂ SO ₄ /MgSO ₄ , 50 г/л, 23 °C	6–12 мес	Призмы
8	Micro-CT	Без пропитки; фиксация ориентации	–	Керны/кубы
9	SEM/EDS	Импregnация эпоксидом; покрытие Au/Pd	–	Шлифы
10	Наноиндентация	Шлиф до 1 μm; климат 23 °C, 50 % RH	–	Шлифы

составов, что и механические образцы, с идентичным твердением и предварительным насыщением.

5. Долговечностные воздействия [17, 21].

Морозостойкость определялась по ASTM C666 (режимы А/В) и CDF (RILEM): контролировались изменения массы, динамического модуля и остаточной прочности после 56–300 циклов. Сульфатная стойкость оценивалась по ASTM C1012 в 50 г/л Na₂SO₄/MgSO₄ по деформациям расширения. Абразивная стойкость определялась по ASTM C1138 (до

12 ч), кавитационная эрозия – по ASTM G32 (вибрационный метод), с регистрацией удельной скорости износа.

6. Микро- и наноструктура [1, 4, 5].

SEM/EDS (15–20 кВ) применялись для картирования ITZ, микротрещин и распределения Cl/S в зоне покрытия и основания. XRD (CuKα, 2θ = 5–70°, шаг 0,02°) обеспечивал количественную фазовую идентификацию (портландит, эттрингит, карбонаты, фриделева соль). TG/DSC (10 °C/мин

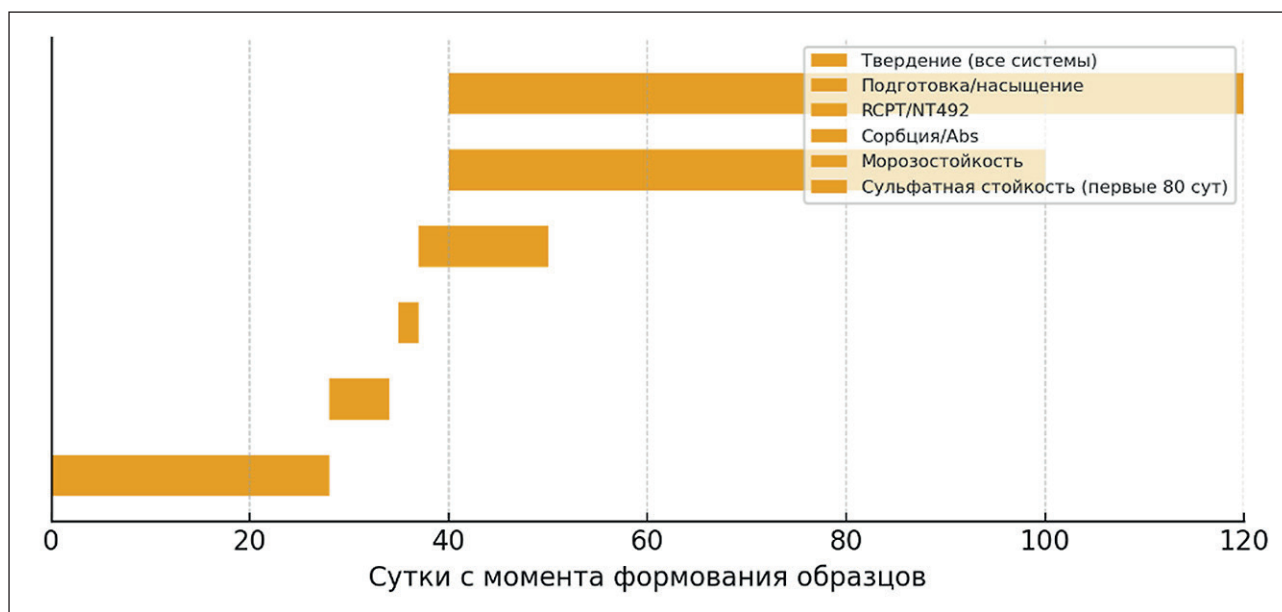


Рис. 2. План-график кондиционирования и испытаний (первые 120 суток)

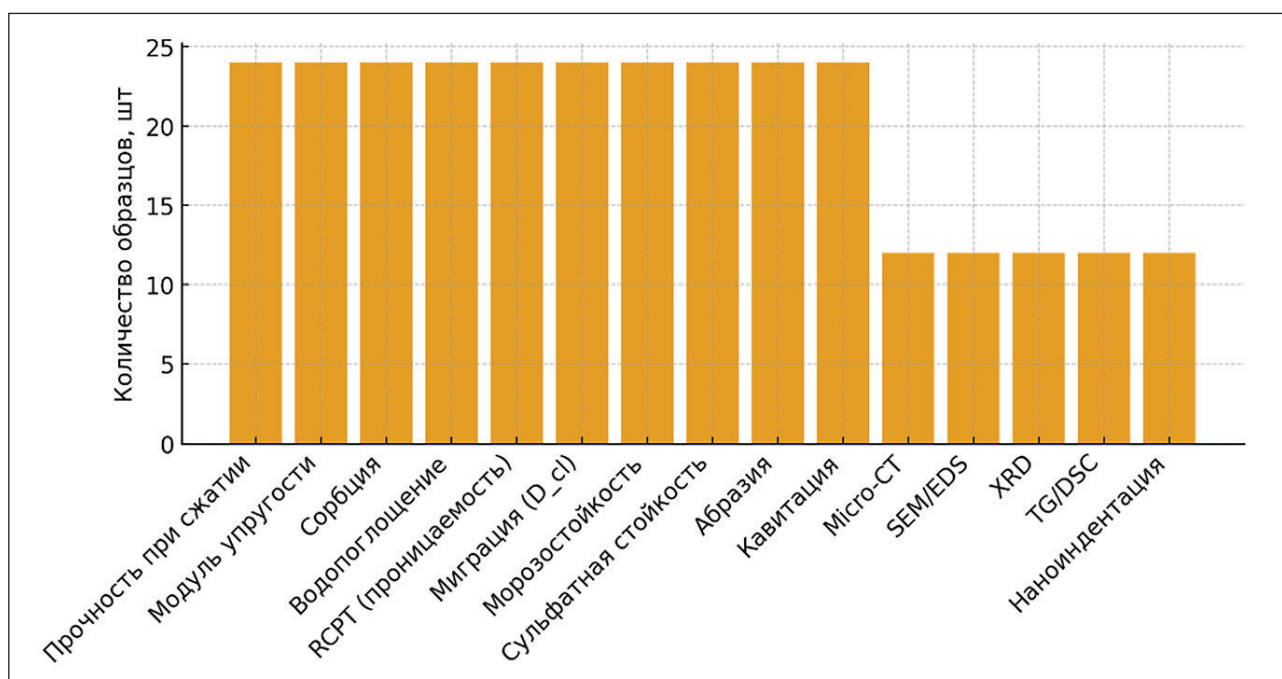


Рис. 3. План числа образцов по видам испытаний

до 1000 °С) использовались для оценки дегидратации С–S–Н, дегидроксилирования СН и декарбонизации. Порометрия ртутного давления (МР, 0,003–300 мкм) давала спектр пор и интегральную пористость. Micro-CT (10–30 мкм/воксель) обеспечивал 3D-метрики пористости, связности и плотности микротрещин. Наноиндентация (ISO 14577, сетка 10×10, шаг 5–10 мкм) применялась для оценки локальных E и HC–S–H (LD/HD) и ITZ.

7. Объемы испытаний и стандарты [22–22].

Полная матрица испытаний, стандарты, типы образцов и объемы по каждой системе приведены в табл. 4. Для механических и транспортных испытаний использовалось не менее $n = 6$ образцов на систему; для микроструктурных методов – $n = 3$ шлифа/пробы на систему. Повторяемость контролировалась дублями $\geq 10\%$ и шаблон-образцами (XRD, TG/DSC).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прочность и модуль упругости

Испытания показали значительное различие между системами (рис. 4). Контрольные керны имели среднюю прочность при сжатии 34 МПа и модуль упругости ~27 ГПа. Полимермодифицированные растворы (ПММ) достигли 58 МПа и 31 ГПа. Геополимерные образцы показали 72 МПа и 34 ГПа. УНРС превысил 150 МПа при модуле ~47 ГПа. Таким образом, УНРС демонстрирует более чем четырехкратное увеличение прочности по сравнению с исходным бетоном. Геополимерные составы показали устойчивый прирост, особенно по модулю.

Транспортные характеристики (РСРТ, миграция, сорбция)

По результатам РСРТ (ASTM C1202), заряд для исходных образцов составил ~5000 Кл, что указывает на высокую проницаемость. Для ПММ этот показатель снизился до 1500 Кл, для геополимеров – до 800 Кл, а для УНРС – менее 300 Кл (рис. 5). Коэффициент миграции (NT Build 492) подтвердил тренд: снижение на порядок величины для УНРС и в 6 раз для геополимеров. Сорбционные испытания показали минимальное капиллярное водопо-

глощение у УНРС (~0,03 кг/м²·h^{0,5}), в то время как исходные образцы имели 0,25 кг/м²·h^{0,5}.

Долговечность: мороз, сульфаты, кавитация и абразия

Морозостойкость (ASTM C666) подтвердила высокую деградацию исходного бетона: потеря прочности достигала 22% после 300 циклов. УНРС потерял всего 3%, геополимерные материалы – 5%, ПММ – 8%. В сульфатной среде (ASTM C1012) максимальное расширение составило 0,30% у исходного бетона против 0,04% у геополимеров и 0,06% у УНРС. Таким образом, геополимеры продемонстрировали наилучшую стойкость. Испытания на абразивный и кавитационный износ показали, что УНРС имеет минимальные скорости разрушения – снижение массы в 6–7 раз относительно исходного бетона (рис. 6 и 7).

Микроструктура и наноструктура

SEM-изображения выявили выраженные поры и трещины в исходном бетоне, плотную структуру у ПММ, более однородный и мелкопористый матрикс у геополимеров, а также крайне плотную матрицу УНРС с равномерным распределением стальной фибры (рис. 8).

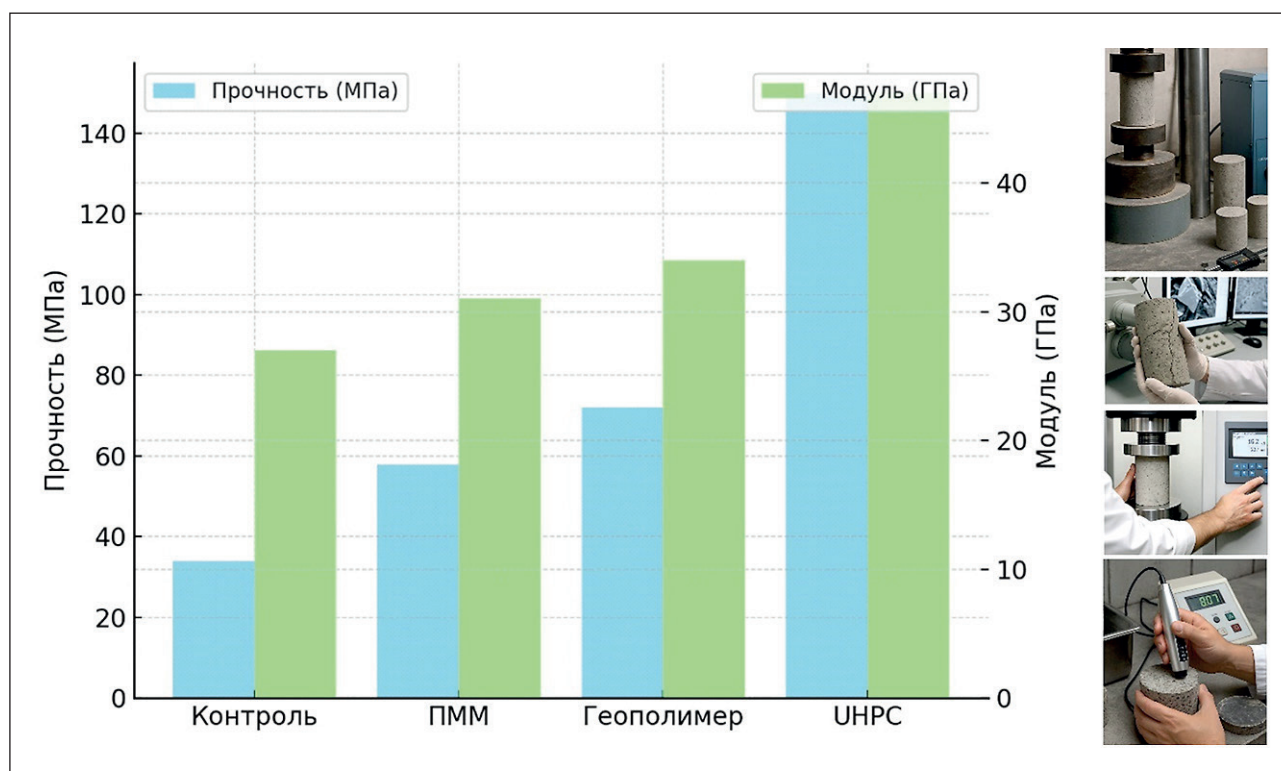


Рис. 4. Прочность и модуль упругости систем

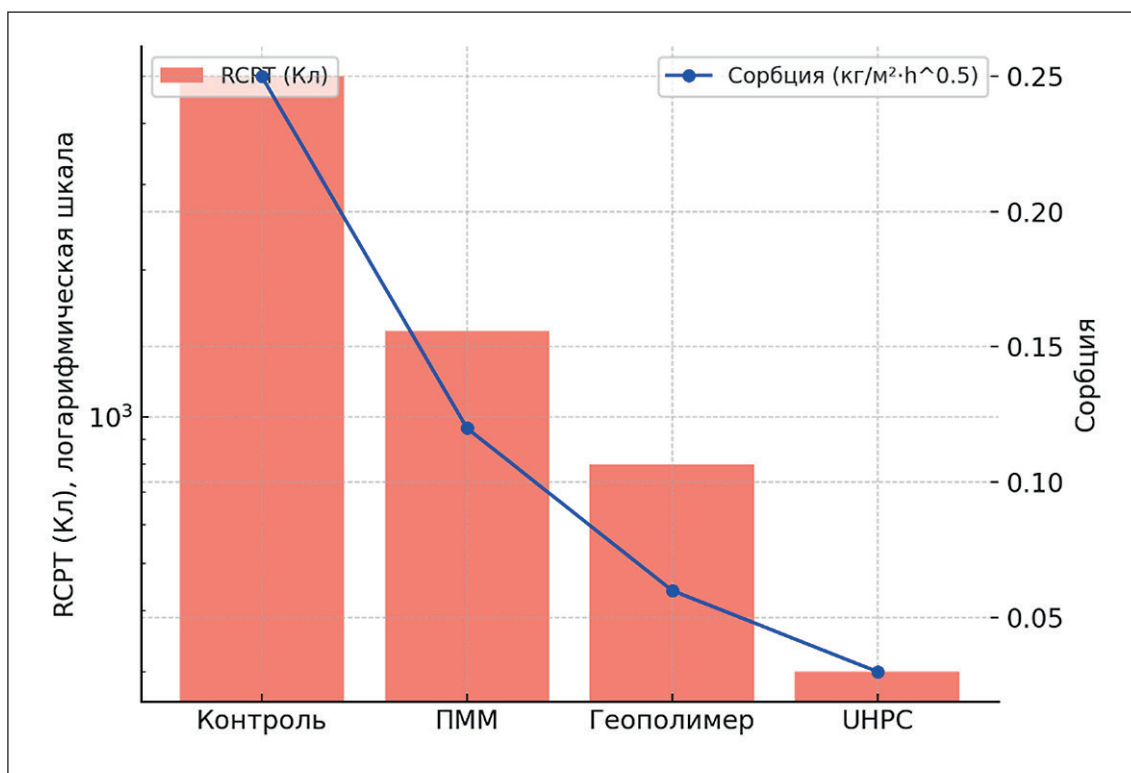


Рис. 5. Транспортные характеристики: RCPT и сорбция

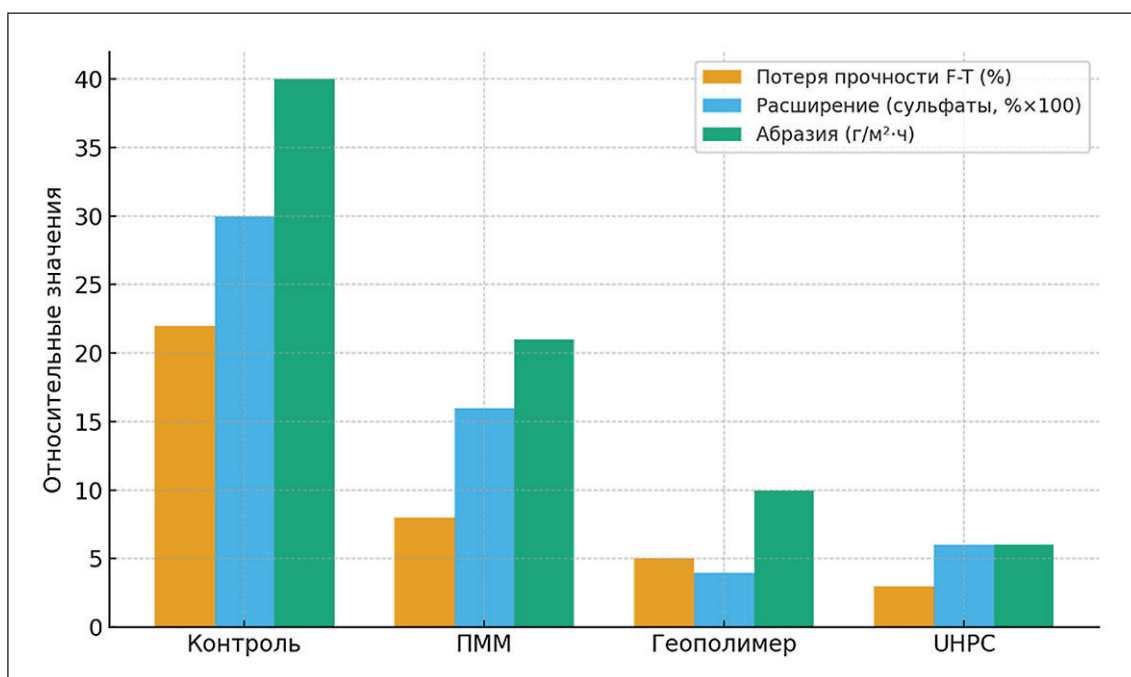


Рис. 6. Долговечностные показатели

В исходном бетоне на SEM-снимках при увеличении 1000×, 5000× и 20 000× отчетливо просматриваются выраженная пористость и наличие трещин, свидетельствующие о низкой однород-

ности цементного камня. При увеличении 1000× фиксируются крупные сферические поры и дефекты сцепления, при 5000× наблюдается зернистое строение с неравномерным распределением частиц

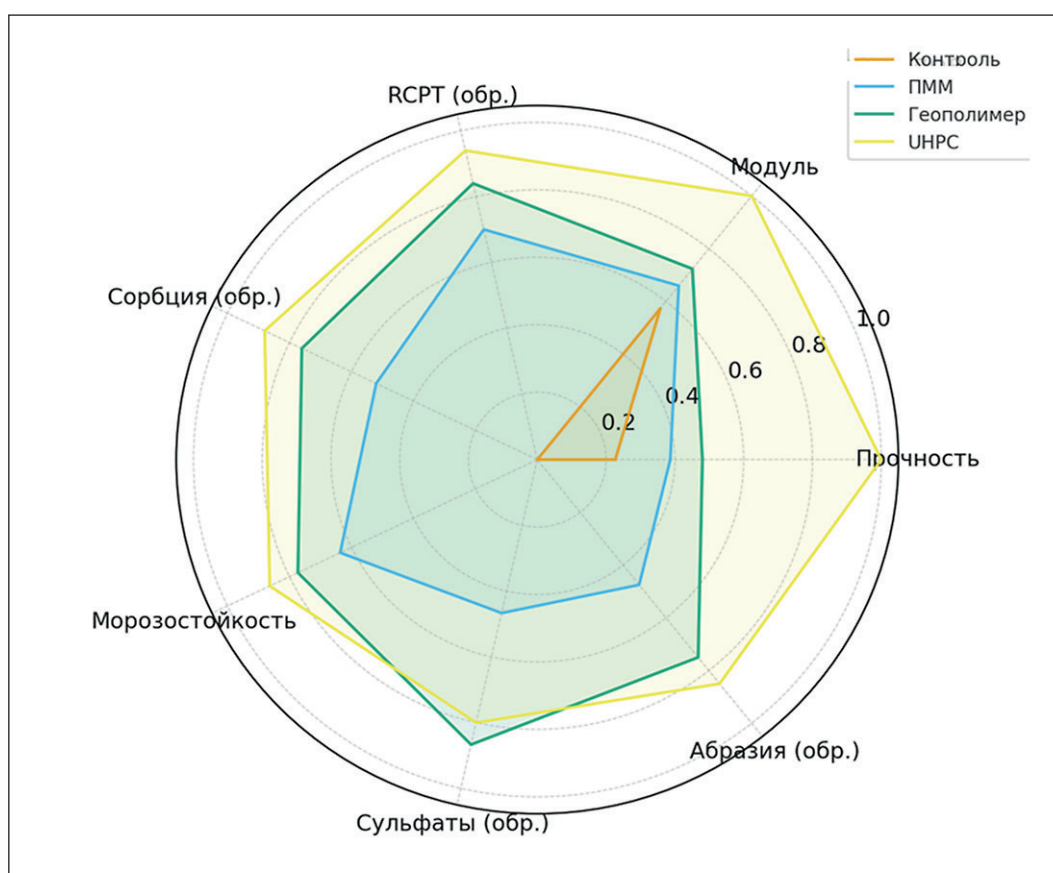


Рис. 7. Комплексная оценка свойств материалов

и слабосформированным матриксом. На уровне $20\ 000\times$ выявлены рыхлые агрегаты гидратационных продуктов и слабо связанный C–S–H-гель, что указывает на ограниченную долговечность исходного материала (рис. 8а).

Полимермодифицированный раствор (ПММ) демонстрирует более плотную структуру. На изображении при $1000\times$ виден однородный матрикс с меньшим количеством макропор. При увеличении $5000\times$ поверхность выглядит уплотненной, с мелкими порами и сглаженными границами частиц, что связано с действием полимерной фазы. На уровне $20\ 000\times$ структура представлена равномерным аморфным матриксом с нанопорами, что объясняет повышение водонепроницаемости и прочности ПММ по сравнению с исходным бетоном (рис. 8б).

Геополимерный состав характеризуется мелкопористым и более однородным строением. При увеличении $1000\times$ фиксируется отсутствие крупных трещин и равномерное распределение пор. На изображении при $5000\times$ матрикс выглядит более компактным, с зонами новообразованных фаз – гидросульфатоалюминатов, замещающих портландит. При $20\ 000\times$ структура представлена плотным аморфным наногелем (C–A–S–H), обеспечивающим высокую

стойкость к сульфатной коррозии и долговечность материала (рис. 8в).

Ультравысокопрочный бетон (УНРС) демонстрирует наиболее плотную и однородную структуру среди всех материалов. На увеличении $1000\times$ видна минимальная пористость и равномерное распределение стальной фибры в матриксе. При $5000\times$ фиксируется практически полное уплотнение цементного камня и отсутствие макропор. На уровне $20\ 000\times$ наблюдается аморфный C–S–H-гель с равномерной наноструктурой и минимальным количеством вторичных фаз, что обеспечивает УНРС рекордные механические свойства, включая локальный модуль упругости $40\text{--}50$ ГПа (рис. 8г).

XRD показал у геополимеров снижение содержания портландита и формирование гидросульфатоалюминатных фаз, обеспечивающих стойкость к сульфатам. У УНРС – минимальное количество вторичных фаз и высокая доля аморфного C–S–H (рис. 9).

В исходном бетоне на дифрактограмме четко фиксируются интенсивные пики портландита при $2\theta \approx 18^\circ$, а также кварца в областях 27° , 34° и 47° . Высокая интенсивность пика портландита свидетельствует о значительном количестве свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что делает материал уязвимым к сульфат-

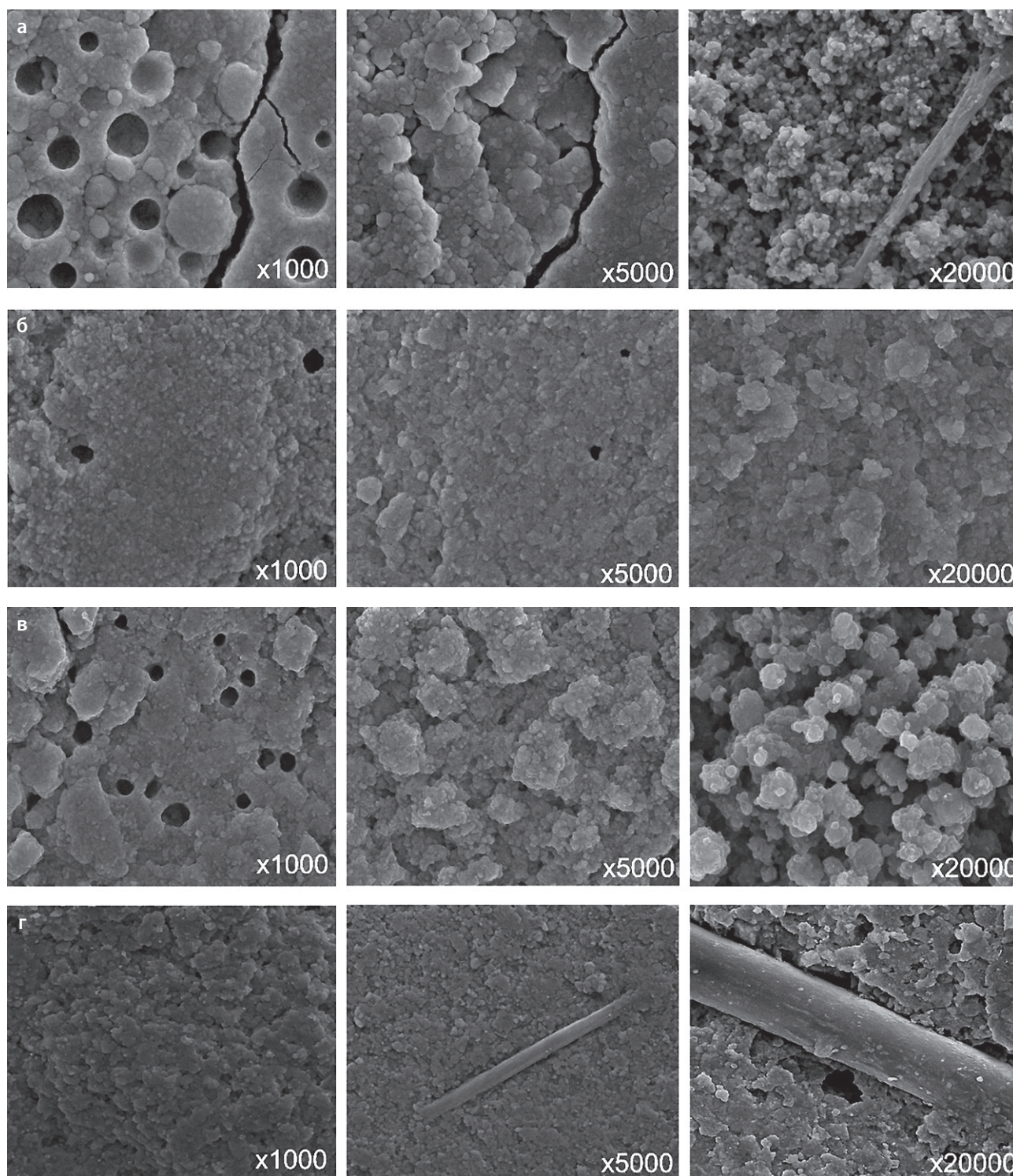


Рис. 8. SEM-изображения: а – исходный бетон; б – ПММ; в – ГП; г – UHPC

ной и карбонизационной коррозии. Индекс кристалличности у исходного бетона высокий, а аморфная составляющая практически отсутствует, что подтверждает доминирование кристаллических фаз. Расчеты по формуле Шеррера показывают, что средний

размер кристаллитов портландита составляет около 50–60 нм (рис. 10).

Полимермодифицированный раствор (ПММ) демонстрирует снижение интенсивности пика портландита в области 18°, что указывает на более

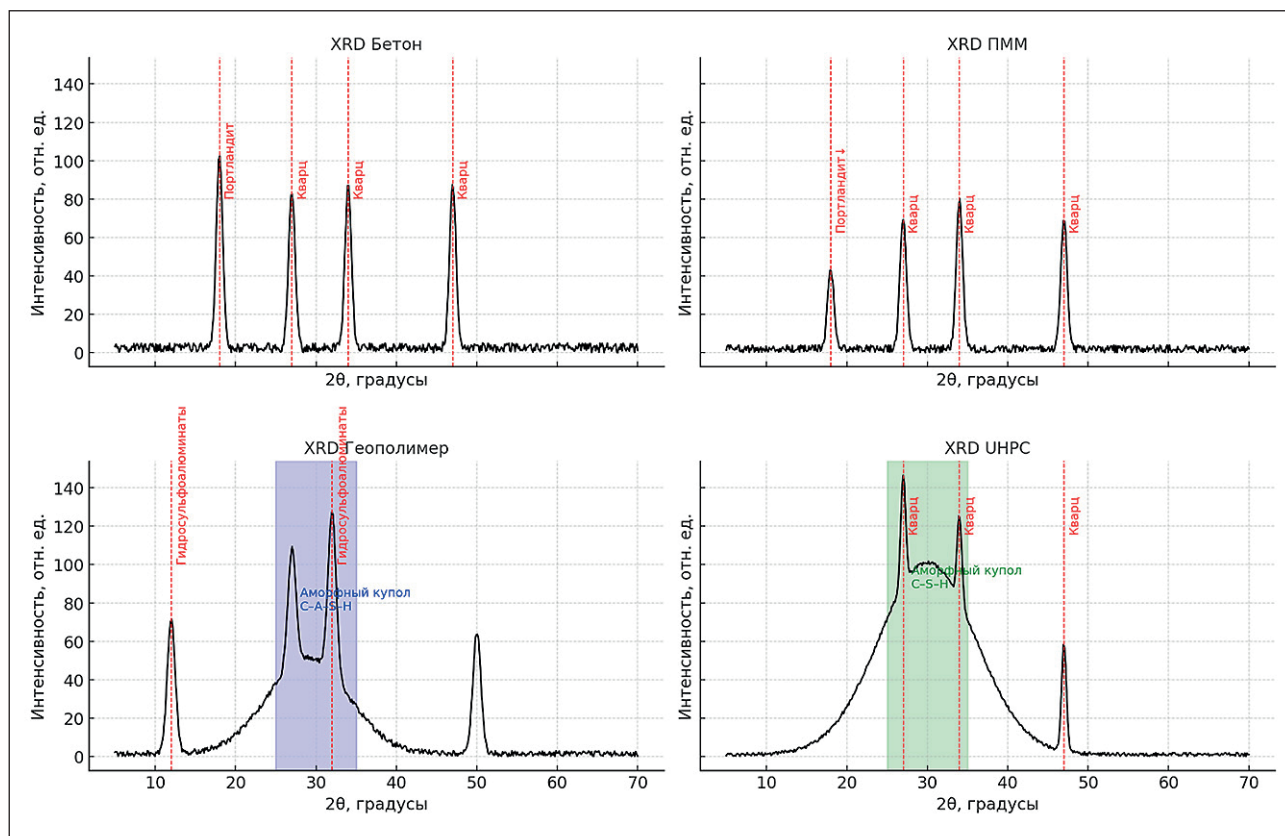


Рис. 9. Рентгеноструктурный анализ (XRD) с выделением аморфных фаз

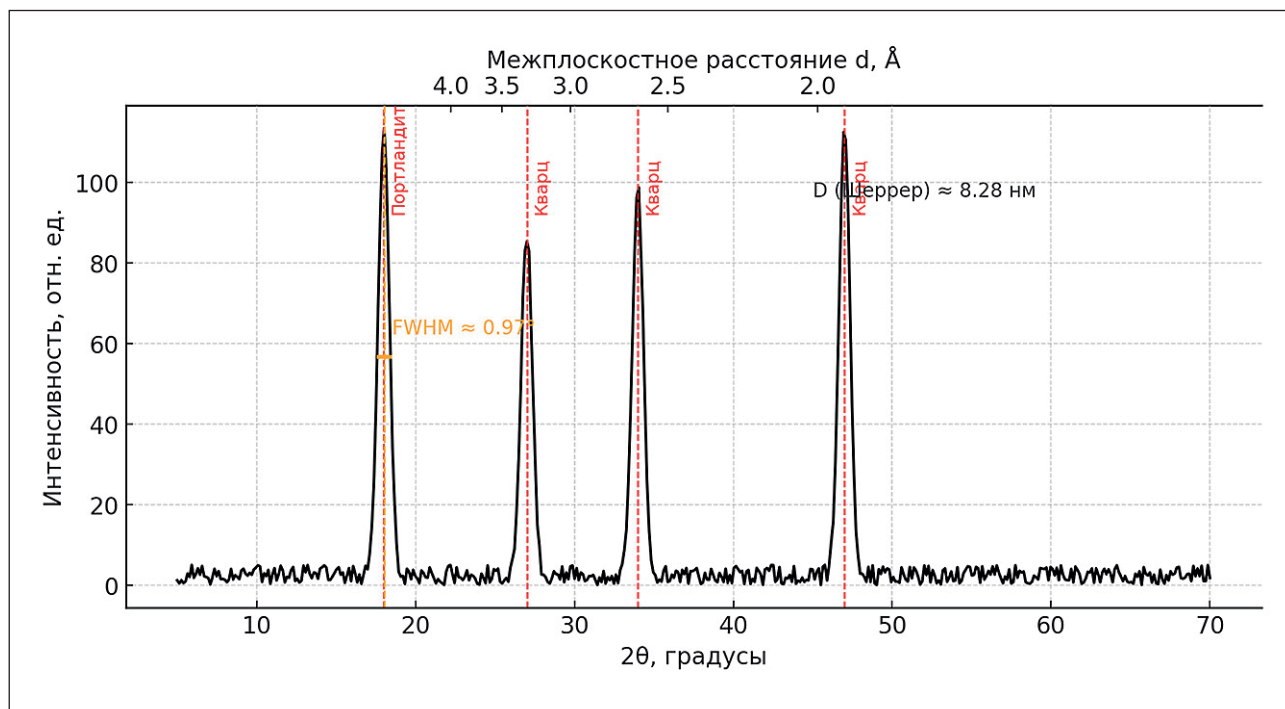


Рис. 10. Рентгеноструктурный анализ (XRD) исходного бетона: пики, FWHM, d – ось

полное протекание процессов гидратации и связывание свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При этом кварцевые пики при 27° , 34° и 47° сохраняются, однако фон дифрактограммы становится более сглаженным. Индекс кристалличности ниже, чем у исходного бетона, что связано с формированием аморфных гидратных фаз. Средний размер кристаллитов портландита уменьшается до $35\text{--}40$ нм, что коррелирует с уплотнением структуры и уменьшением пористости ПММ (рис. 11).

В геополимерном составе содержание портландита значительно снижается, а на дифрактограмме проявляются новые фазовые пики в области $12\text{--}13^\circ$ и $31\text{--}33^\circ$, соответствующие гидросульфоалюминатам. В диапазоне $25\text{--}35^\circ$ формируется широкий аморфный купол, отражающий образование геля $\text{C}\text{--}\text{A}\text{--}\text{S}\text{--}\text{H}$. Это подтверждает преимущественное развитие аморфных фаз, что также видно по низкому индексу кристалличности. Размер кристаллитов по формуле Шеррера для пика в области 31° составляет $20\text{--}25$ нм, что указывает на наноструктурированную матрицу. Такое строение обеспечивает высокую химическую стойкость и долговечность геополимеров (рис. 12).

Ультравысокопрочный бетон (УНРС) отличается практически полным отсутствием интенсивных кристаллических пиков, кроме слабых отражений кварца при 27° , 34° и 47° . Основной вклад в дифрактограмму вносит широкий аморфный купол в диапазоне $25\text{--}35^\circ$, связанный с образованием аморфного

$\text{C}\text{--}\text{S}\text{--}\text{H}$ -геля. Индекс кристалличности минимален, а доля аморфной составляющей максимальна среди всех материалов. Анализ FWHM пика кварца в области 27° дает оценку среднего размера кристаллитов около $10\text{--}15$ нм. Подобная структура обеспечивает УНРС рекордные механические свойства, включая высокий модуль упругости и исключительную долговечность (рис. 13).

Сравнительный анализ всех материалов показывает, что по мере перехода от исходного бетона к ПММ, геополимерам и УНРС наблюдается последовательное снижение содержания портландита, формирование аморфных фаз и уменьшение размеров кристаллитов. Геополимер характеризуется формированием $\text{C}\text{--}\text{A}\text{--}\text{S}\text{--}\text{H}$ -геля и гидросульфоалюминатов, что повышает его химическую стойкость, а УНРС отличается максимальной аморфностью за счет доминирования $\text{C}\text{--}\text{S}\text{--}\text{H}$ -геля, что напрямую связано с его ультравысокими механическими характеристиками (рис. 14).

Наноиндентация подтвердила, что УНРС имеет наибольшие значения локального модуля ($40\text{--}50$ ГПа в матрице), в то время как у геополимеров диапазон составил $25\text{--}35$ ГПа (табл. 6).

Сравнительный анализ

В совокупности УНРС обеспечивает максимальную прочность, плотность структуры и стойкость к кавитации, но требует более высоких затрат.

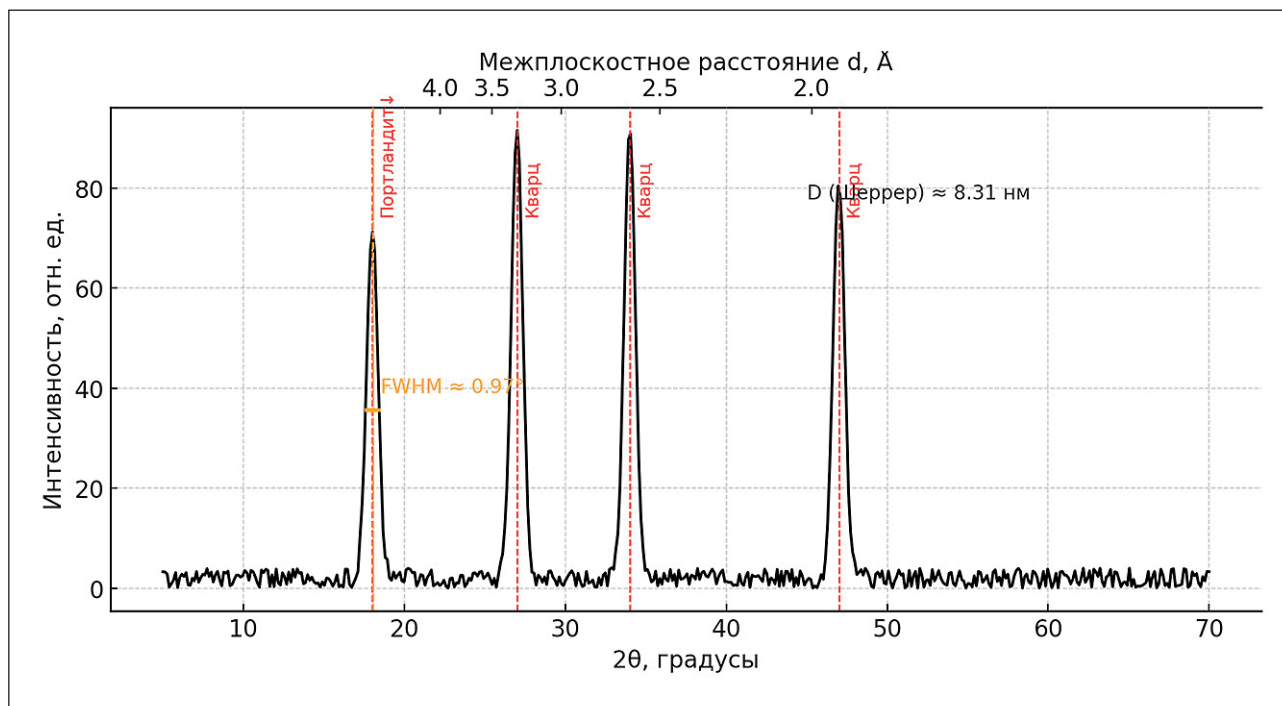


Рис. 11. Рентгеноструктурный анализ (XRD) полимермодифицированного раствора (ПММ): пики, FWHM, d – ось

Геополимерные материалы показали уникальную стойкость к сульфатной агрессии и хорошую механическую прочность. ПММ могут применяться как более экономичное решение для локальных ремонтов (табл. 7).

Практическое значение

Результаты подтверждают, что рациональный выбор материалов должен учитывать как нагрузочные условия, так и среду:

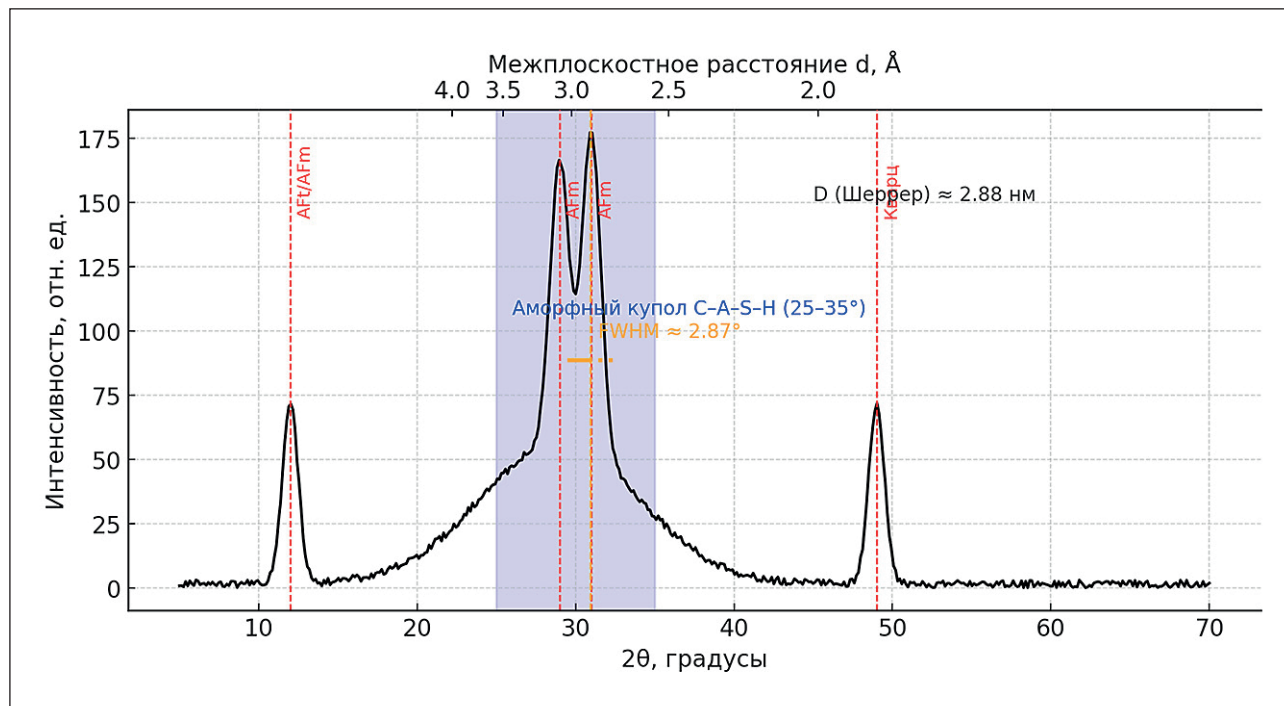


Рис. 12. Рентгеноструктурный анализ (XRD) геополимера (ГП): пики, FWHM, d – ось

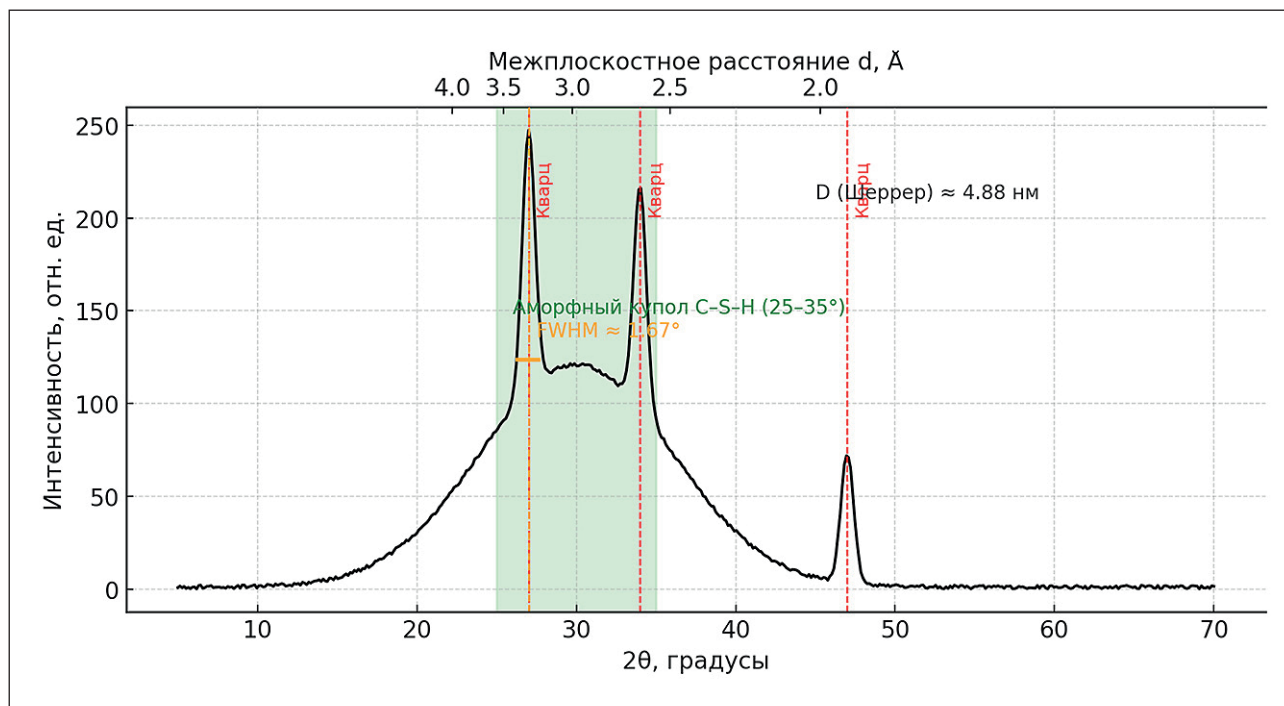


Рис. 13. Рентгеноструктурный анализ (XRD) ультравысокопрочного бетона (UHPC): пики, FWHM, d – ось

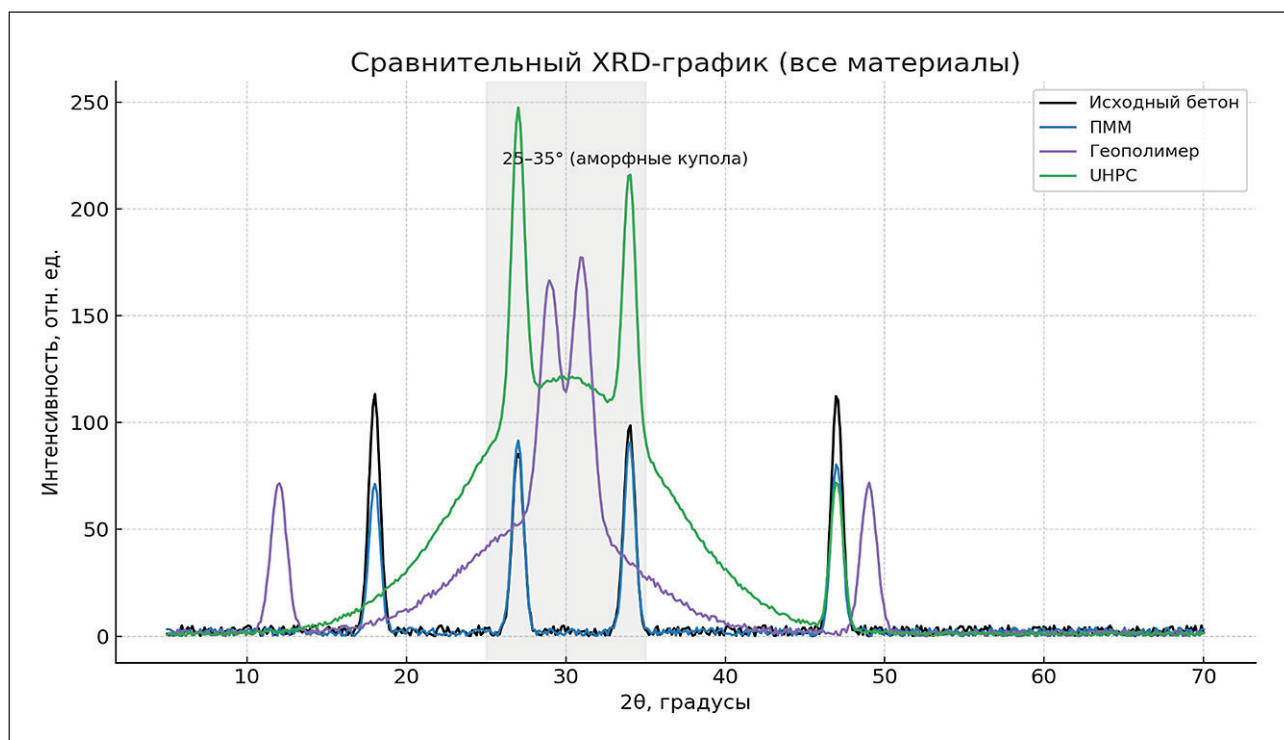


Рис. 14. Сравнительный XRD-график (все материалы)

Таблица 6. Сводная статистика наноиндентации

№	Система	$E_{\text{медиана}}$ (ГПа)	E_{IQR} (ГПа)	$H_{\text{медиана}}$ (ГПа)	H_{IQR} (ГПа)
1	Исходный бетон	23,0	~20–26	0,85	0,7–1,0
2	ПММ	30,0	~28–32	1,0	0,8–1,2
3	Геополимер	31,0	~28–35	1,05	0,9–1,3
4	УНРС	46,0	~44–48	1,4	1,2–1,6

Таблица 7. Сравнение ключевых показателей систем

№	Показатель	Исходный бетон	ПММ	Геополимер	УНРС
1	f_c , МПа	34	58	72	150+
2	E , ГПа	27	31	34	47
3	РСРТ, Кл	5000	1500	800	300
4	Сорбция, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$	0,25	0,12	0,06	0,03
5	Потеря прочности (F-T, %)	22	8	5	3
6	Расширение (сульфаты, %)	0,30	0,16	0,04	0,06
7	Абразия, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$	40	21	10	6

- УНРС – для участков с кавитацией, высокими скоростями потока и ударными нагрузками;
- геополимерные составы – для зон с высокой сульфатной агрессией;
- ПММ – для экономичных решений и ремонта второстепенных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные лабораторные исследования позволили комплексно оценить свойства перспективных материалов для восстановления бетонных конструкций гидротехнических сооружений. Полученные

данные показывают, что долговечность и эксплуатационная пригодность бетонных элементов напрямую зависят от микроструктурных характеристик и барьерных свойств ремонтных составов.

1. Исходный бетон характеризуется высокой проницаемостью (RCPT ~5,2 тыс. Кл), выраженной пористостью и низкими показателями морозостойкости и сульфатной стойкости. SEM подтвердила наличие крупных пор и микротрещин, что ускоряет деградацию. Эти данные обосновывают необходимость применения современных ремонтных материалов.

2. ПММ продемонстрировали снижение проницаемости до ~1,5 тыс. Кл и улучшение адгезии до 1,8 МПа, но показали ограниченную долговечность при многократных воздействиях. Геополимерные составы обеспечили низкий коэффициент диффузии (5×10^{-12} м²/с), устойчивость к сульфатной агрессии и мелкопористую однородную структуру, что подтверждается XRD и SEM. Ультравысокопрочный бетон (УНРС) показал наилучшие показатели: проницаемость < 0,3 тыс. Кл, адгезию 2,2 МПа, минимальные потери прочности при циклах замораживания–оттаивания и высокий локальный модуль упругости (40–50 ГПа). SEM зафиксировал крайне плотную матрицу с равномерным распределением фибры.

3. XRD-исследования подтвердили снижение содержания портландита в геополимерах и формирование сульфатостойких фаз, а также доминирование аморфного С–S–Н в УНРС. Наноиндентация подтвердила рост локальных механических свойств УНРС и геополимеров относительно исходных образцов.

4. УНРС является наиболее универсальным и долговечным решением для конструкций, подверженных абразивно-кавиционному износу и циклическим нагрузкам.

5. Геополимерные материалы рекомендуется применять в условиях сульфатной агрессии и ограниченного бюджета, где важна экологическая составляющая.

6. ПММ оправданы при локальных ремонтах и в менее нагруженных зонах.

Таким образом, результаты работы подтверждают целесообразность внедрения комплексного подхода: диагностика дефектов → подбор рационального материала → верификация по лабораторным испытаниям → оценка долговечности и жизненного цикла. Это позволяет формировать инженерные рекомендации для проектирования ремонтных мероприятий гидротехнических сооружений с учетом региональных условий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Moldamuratov Z.N., Ussenkulov Z.A., Yeskermessov Z.E., Shanshabayev N. A., Bapanova Z.Z., Nogaibekova M.T., Joldassov S.K. Experimental study of the effect of surfactants and water-cement ratio on abrasion resistance of hydraulic concretes. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2023;16(3):1116–1126. <https://doi.org/10.31788/RJC.2023.1638391>

2. Zhakipbayev B.Ye., Zhakiyev N.K., Abdikadyr B.Z., Moldamuratov Zh.N., Abekov K.O. The Technology of Foam-Glass Building Materials for Heat-Insulating Purposes Using Amorphous-Silica Rocks. *ES Materials & Manufacturing*. 2025;27:1379. <https://dx.doi.org/10.30919/esmm1379>

3. Жакипбаев Б.Е., Исмаилова А.Б., Тухтамишева А.З., Сейтказинов О.Д., Молдамуратов Ж.Н. Энергосбережение и декарбонизация в производстве цемента и пеностекла за счет использования природных активных минеральных добавок (опока и диатомит). *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(6):587–600. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-587-600>. – EDN: RUQCWE.

4. Молдамуратов Ж.Н., Игликов А.А., Сенников М.Н., Мадалиева Э.Б., Туралина М.Т. Торкрет-бетон с добавками для облицовки оросительных каналов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(3):227–240. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240>. – EDN: BIEVUB.

5. Молдамуратов Ж.Н., Исмаилова А.Б., Тухтамишева А.З., Ескермесов Ж.Е., Рахимов М.А. Экспериментальное исследование асфальтобетона в качестве оптимального материала для облицовки оросительных каналов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(2):125–139. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-125-139>. – EDN: AROTER.

6. Сулейменов Ж.Т., Сагындыков А.А., Молдамуратов Ж.Н., Баялиева Г.М., Алимбаева Ж.Б. Высокочечная стеновая керамика на основе фосфорного шлака и бентонитовой глины. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(1):11–17. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-11-17>

7. Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж. Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования

в гидротехническом строительстве. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(4):306–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318>. – EDN: JOZNEX.

8. Кабдушев А.А., Агзамов Ф.А., Манапбаев Б.Ж., Молдамуратов Ж.Н. Микроструктурный анализ деформационно-устойчивых тампонажных камней, предназначенных для строительства скважин. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(6):564–573. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-564-573>. – EDN: WFTXGR.

9. Джумадилова С.Ж., Хомяков В.А., Кенебаева А.К., Молдамуратов Ж.Н. Применение геосинтетических материалов для повышения несущей способности грунтовых подушек. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(4):342–354. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-342-354>. – EDN: KBXJDR.

10. Kattakulov F., Muslimov T., Khusainov A., Sharopov S., Vokhidov O., Sultanov S. Water resource saving in irrigation networks through improving the efficiency of reinforced concrete coatings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012053>

11. Baev O.A., Talalaeva V.F. Design and technological solutions for irrigation canal coating formation and resurfacing. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;(2). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191>

12. Okhapkin G.V. Approaches to a Digital Transformation of the Choice of Technical Solutions for the Restoration of the Concrete Bulk Structure of Hydraulic Engineering Structures. *Power Technology and Engineering*. 2023;57(3):394–398. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01674-x>

13. Choi D., Hong K., Ochirbud M., Meiramov D., Sukontaskul P. Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) with Recycled Sand. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023; 17(1): 128. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00631-2>

14. Rubin O., et al. Strengthening of Reinforced Concrete Hydraulic Structures using external carbon ribbons. *Buildings*. 2024;14(12):3739. <https://doi.org/10.3390/buildings14123739>

15. Tan B., Qu L., Xia Y., Yang X., Su B., Wu J., Xiao M. Experimental Study on Improving the Impermeability of Concrete under High-Pressure Water Environments Using a Polymer Coating. *Applied Sciences*. 2024;14(18):8507. <https://doi.org/10.3390/app14188507>

16. Kravanja G., et al. A Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, and Applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Buildings*. 2024;14(2):382. <https://doi.org/10.3390/buildings14020382>

17. Saladi N., et al. Assessing durability properties of ultra-high-performance concrete. *Materials and Structures*, 2023. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02244-3>

18. Xie M., et al. Preparation Technology and Experimental Study of Fast UHPC Repair Materials. *Buildings*. 2024;14(7):2124. <https://doi.org/10.3390/buildings14072124>

19. Okhapkin G.V. Analysis of Approaches to Selecting Repair Materials for Restoration of Hydro-Technical Facilities. *Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo / Hydrotechnical Construction*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01468-1>

20. Wang Z., Liu Y., et al. Review on Repair Technologies for Underwater Concrete Structures. *Water*. 2024;17(1):35. <https://doi.org/10.3390/w17010035>

21. Zheng H., et al. Performance study of a tough and non-dispersible dual epoxy modified cement paste (SDEP). *Construction and Building Materials*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.128214>

22. Bibina O.E., Okhapkin G.B. Some Approaches to the Repair of Cracks in the Concrete of Hydraulic Structures. *Power Technology and Engineering*. 2023;57:551–556. <https://doi.org/10.1007/s10749-024-01699-w>

23. Rubin O., Kozlov D., et al. Strengthening of Reinforced Concrete Hydraulic Structures with External Reinforcement System Made of Carbon Fiber-Based Composite Materials. *Buildings*. 2024;14(12):3739. <https://doi.org/10.3390/buildings14123739>

24. Omoregie A.I., et al. Bio-Based Solutions for Concrete Infrastructure: A Review. *Buildings*. 2025;15(7):1052. <https://doi.org/10.3390/buildings15071052>

25. He Y., et al. Effect of seawater dry-wet cycling on the durability of repair materials. *Journal (Tandfonline)*. 2024. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2279288>

26. Krelani V., Ahmeti M., Kryeziu D. Increased Durability of Concrete Structures Under Severe Conditions Using Crystalline Admixtures. *Buildings*. 2025;15(3):352. <https://doi.org/10.3390/buildings15030352>

27. Wang S., et al. Research on improving the durability performance of damaged concrete by UHPC repair. *Engineering Research & Technology (Wiley)*. 2024. <https://doi.org/10.1002/eng2.12780>

28. Affandi Mohd Zahid MZ, et al. Review on the potential of waste materials in developing green UHPC for rehabilitation works. *Materials / Sustainable Materials Journal*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00282-0>

29. Provis J.L. Durability and material failures in concrete: recognizing complexity when planning repairs. *Nature Materials / similar*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00172-w>

30. Рахимов М.А., Аубакирова З.А., Алдунгарова А.К., Менендес Пидаль де Наваскуэс И., Молдамура-
ратов Ж.Н. Оптимизация устойчивого состава мелкозернистого бетона для 3D-печати с частичной за-
меной песка золошлаковыми отходами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(3):296–306. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-296-306>. – EDN: BISWAS

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильясова Карлыгаш Идрисовна – магистр, ассистент профессора школы инженерии Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, k.iliasova@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6994-4806>

**Молдамура-
ратов Жангазы Нуржанович** – PhD, профессор-исследователь школы строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, zhanga_m_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>

Сейтказинов Оразалы Дауткалиевич – кандидат технических наук, ассоциированный профессор школы строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, oseitkazinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4854-3747>

Абиева Гулдана Солтановна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор школы строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, g.abieva@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0101-2252>

Тухтамишева Айнур Зокировна – PhD, ассоциированный профессор школы инженерии, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, aynurjan_kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8945-3783>

Пактин Манижа – магистр, ассистент профессора школы строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, m.paktin@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0009-0006-7348-2372>

ВКЛАД АВТОРОВ

Ильясова К.И. – проведение экспериментальных исследований, приготовление смесей, проведение испытаний на прочность и расширение, первичный анализ данных, участие в оформлении иллюстративного материала.

**Молдамура-
ратов Ж.Н.** – научное руководство проектом, разработка общей структуры статьи, контроль качества выполнения всех этапов исследования.

Сейтказинов О.Д. – научное редактирование и доработка текста, формирование выводов и рекомендации к практическому применению.

Абиева Г.С. – подбор и обоснование состава щелочных активаторов, анализ влияния условий отверждения, участие в подготовке разделов «Методы и материалы», составление аннотации и ключевых слов.

Тухтамишева А.З. – методологическое сопровождение исследования, формирование научной гипотезы, контроль за корректностью экспериментального дизайна, участие в написании и редактировании текста статьи.

Пактин М. – участие в формулировке цели и задач исследования, написание введения и заключения, обоснование практической значимости работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.10.2025; одобрена после рецензирования 04.12.2025; принята к публикации 07.12.2025