





Научная статья / Original Article

УДК 691.335

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-678-696>

CC BY 4.0

Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов за счет применения модифицированного бетона

Алибек Маратович Иманов¹ , Жангазы Нуржанович Молдамуратов^{2,3*} ,
Оразалы Дауткалиевич Сейтказинов^{2,3} , Айнур Зокировна Тухтамишева^{2,3*} ,
Айганым Бахтияровна Исмаилова^{2,3} , Галия Мухамедиевна Рахимова¹ 

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

² Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

³ Казахская головная архитектурно-строительная академия, Алматы, Казахстан

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: zhangam_n@mail.ru, aynurjan_kz@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях Южного Казахстана оросительные каналы играют ключевую роль в обеспечении сельского хозяйства водой. Эксплуатация традиционных бетонных облицовок осложняется их низкой стойкостью к растрескиванию, морозному пучению, абразивному износу и воздействию агрессивных сред. Эти факторы ведут к росту фильтрационных потерь, которые в отдельных случаях превышают 20–25 % поданного объема воды, что критично для региона с резкоконтинентальным климатом и дефицитом водных ресурсов. Для повышения долговечности и водонепроницаемости гидротехнических сооружений разработан модифицированный бетон (МБ) с комплексом минеральных и химических добавок. **Методы и материалы.** Состав МБ включает портландцемент и шлакопортландцемент, кварцевый песок, гранитный щебень, микрокремнезем (7% от массы цемента), золу-унос, воздухововлекающую добавку (0,05%) и гидрофобизирующие компоненты. Исследования проводились по методикам ГОСТ: прочность на сжатие и при расколе (ГОСТ 10180), морозостойкость (ГОСТ 10060), водонепроницаемость (ГОСТ 12730.5), абразивная стойкость (ГОСТ 13087), сульфатостойкость (ГОСТ 31384). Микро- и наноструктура анализировалась методами SEM, EDS и XRD. **Результаты и обсуждение.** По сравнению с контрольным бетоном (КБ) МБ показал: увеличение прочности на сжатие до 55 МПа (+14,6%) и при расколе до 4,6 МПа (+27,8%); повышение морозостойкости с 220 до 320 циклов (+45%); рост водонепроницаемости с W6 до W9 (+50%); улучшение абразивной стойкости на 26,9%; повышение коэффициента сульфатостойкости на 11,5%. Микроструктурный анализ выявил уплотнение цементного камня, снижение макропористости и увеличение содержания низкоосновных C–S–H фаз, что подтверждает долговечность материала. **Заключение.** Разработанный модифицированный бетон демонстрирует комплексное улучшение эксплуатационных характеристик, обеспечивая повышение межремонтного интервала облицовок на 30–40% и сокращение фильтрационных потерь до 20%. Его внедрение в строительство и реконструкцию оросительных каналов Южного Казахстана позволит повысить эффективность водопользования и устойчивость гидротехнических сооружений в условиях агрессивного воздействия среды и дефицита водных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микро- и наноструктура, модифицированный бетон, облицовка каналов, водонепроницаемость, морозостойкость, абразивная стойкость, сульфатостойкость

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Иманов А.М., Молдамуратов Ж.Н., Сейтказинов О.Д., Тухтамишева А.З., Исмаилова А.Б., Рахимова Г.М. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов за счет применения модифицированного бетона. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):678–696. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-678-696>. – EDN: MFTDRV.

Enhanced operational reliability of irrigation canals through the application of modified concrete

Alibek M. Imanov¹ , Zhanga N. Moldamuratov^{2,3*} , Orazaly D. Seitkazinov^{2,3} , Ainur Z. Tukhtamisheva^{2,3*} , Aiganym B. Ismailova^{2,3} , Galiya M. Rakhimova¹ 

¹ Abylka Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

² International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

³ Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author: e-mail: zhanga_m_n@mail.ru, aynurjan_kz@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. In the conditions of Southern Kazakhstan, irrigation canals play a crucial role in supplying water for agricultural production. The operation of conventional concrete linings is complicated by their low resistance to cracking, frost heave, abrasive wear, and exposure to aggressive environments. These factors lead to increasing filtration losses, which in some cases exceed 20–25% of the water supplied volume—an especially critical issue for a region characterized by a sharp continental climate and limited water resources. To improve the durability and impermeability of hydraulic structures, a modified concrete (MC) mixture incorporating a combination of mineral and chemical additives has been developed. **Materials and Methods.** The composition of the MC includes Portland cement and slag-Portland cement, quartz sand, granite coarse aggregate, silica fume (7% of the cement mass), fly ash, an air-entraining agent (0.05%), and hydrophobizing components. The experimental investigations were conducted in accordance with relevant GOST standards: compressive and splitting tensile strength (GOST 10180), frost resistance (GOST 10060), water impermeability (GOST 12730.5), abrasive resistance (GOST 13087), and sulfate resistance (GOST 31384). The micro- and nanostructure of the material was analyzed using SEM, EDS, and XRD methods. **Results and Discussion.** Compared with the control concrete (CC), the modified concrete demonstrated significant performance improvements: an increase in compressive strength up to 55 MPa (+14.6%) and in splitting tensile strength up to 4.6 MPa (+27.8%); an increase in frost resistance from 220 to 320 cycles (+45%); an improvement in water impermeability from W6 to W9 (+50%); enhanced abrasion resistance by 26.9%; and an increase in the sulfate resistance coefficient by 11.5%. Microstructural analysis revealed densification of the cement matrix, a reduction in macroporosity, and an increase in the content of low-basic C–S–H phases, which confirms the material's enhanced durability. **Conclusion.** The developed modified concrete exhibits a comprehensive improvement in operational performance, ensuring a 30–40% extension of the service life of canal linings and a reduction in filtration losses by up to 20%. Its implementation in the construction and rehabilitation of irrigation canals in Southern Kazakhstan will enhance water-use efficiency and improve the resilience of hydraulic structures under aggressive environmental impacts and persistent water scarcity.

KEYWORDS: micro- and nanostructure, modified concrete, canal lining, water impermeability, frost resistance, abrasion resistance, sulfate resistance

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

FOR CITATION:

Imanov A.M., Moldamuratov Zh.N., Seitkazinov O.D., Tukhtamisheva A.Z., Ismailova A.B., Rakhimova G.M. Enhanced operational reliability of irrigation canals through the application of modified concrete. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(6):678–696. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-678-696>. – EDN: MFTDRV.

ВВЕДЕНИЕ

Деградация традиционных облицовок оросительных каналов в Южном Казахстане особенно критична в контексте нарастающего дефицита водных ресурсов для сельского хозяйства. Этот регион является основным производителем хлопчатника, овощных и плодово-ягодных культур, где 80–85% потребления воды приходится на орошение. В засушливые годы доступный объем водных ресурсов снижается на 20–40% по сравнению с многолетней нормой,

а общий дефицит в вегетационный период достигает 1,0–1,5 млрд м³ [1].

В условиях высокой зависимости сельского хозяйства региона от стабильного водоснабжения задача повышения долговечности и водонепроницаемости облицовок приобретает стратегическое значение.

В южных регионах Казахстана – Туркестанской, Жамбылской и Алматинской областях – эксплуатируется более 12 тыс. км оросительных каналов, облицованных цементно-бетонными плитами. Большая часть каналов была возведена в 1960–1980-х го-

дах и достигла или превысила свой проектный срок службы. Результаты натурных обследований и эксплуатационного мониторинга показывают, что уже через 8–12 лет после ввода в эксплуатацию большинство облицовок теряют проектные гидроизоляционные и прочностные характеристики, что приводит к увеличению фильтрационных потерь на 20–35% и снижению коэффициента полезного действия (КПД) оросительных систем до 0,55–0,65 [1, 4].

Разрушения традиционных облицовок носят комплексный характер, обусловленный сочетанием климатических, гидравлических и химико-минералогических факторов [1, 4, 10]. Ниже приведены основные факторы:

1. Растрескивание бетонных плит. Возникает под действием температурно-влажностных деформаций, усадки цементного камня и неравномерной осадки основания. В летний период амплитуда суточных колебаний температуры облицовки достигает 45–50 °С, что вызывает чередование сжатия и растяжения бетона. При этом ширина трещин в среднем составляет 1–5 мм, а их глубина часто превышает толщину защитного слоя. Через образовавшиеся дефекты фильтрационные потери могут достигать 0,5–1,0 л/с·м², что особенно критично в условиях дефицита воды [4, 11].

2. Вымывание цементного камня (гидроабразивная эрозия). На участках с криволинейным руслом и повышенной скоростью потока (1,5–2,0 м/с) наблюдается интенсивное разрушение цементного камня за счет воздействия абразивных частиц (песок, ил) с концентрацией до 2–3 кг/м³. Уже через 5 лет эксплуатации прочность на сжатие в зоне контакта с потоком снижается на 15–25% по сравнению с исходной [5, 12].

3. Воздействие агрессивных сред. Химический анализ воды каналов региона выявляет повышенные концентрации сульфатов (SO₄²⁻ до 250–350 мг/л) и хлоридов (Cl⁻ до 150–200 мг/л), что приводит к сульфатной и хлоридной коррозии цементного камня. Процесс сопровождается расширением продуктов реакции, образованием микротрещин и постепенным снижением водонепроницаемости бетона с W6 до W2–W4 в течение 7–10 лет эксплуатации [2, 13].

4. Морозное пучение. В зимний период температура воздуха в регионе может опускаться до –25 °С, а бетонная облицовка к этому моменту насыщена влагой. Повторные циклы замораживания и оттаивания приводят к увеличению внутреннего давления в порах вследствие кристаллизации льда, что снижает морозостойкость с F200 до F50–F100 уже после 5–7 зимних сезонов [1, 4, 13–18].

5. Кавитационное разрушение. В локальных зонах гидравлических перепадов и сопряжений, где

скорость потока превышает 3,0–3,5 м/с, возникает кавитация, приводящая к образованию каверн глубиной 5–20 мм за один вегетационный сезон. Эти дефекты служат концентраторами напряжений и ускоряют общее разрушение облицовки [5, 19–23].

В условиях Южного Казахстана эти процессы протекают с повышенной интенсивностью из-за высокого испарения (1000–1200 мм/год), значительных температурных амплитуд и недостатка воды для орошения, что делает критически важным снижение потерь и продление срока службы облицовки. Утрата целостности покрытия не только увеличивает фильтрацию, но и приводит к размыву основания канала, деформации сечения и в конечном счете – снижению пропускной способности [1, 4, 33–34].

Фильтрация через дефектные участки облицовки каналов является одной из наиболее значимых причин неэффективного использования водных ресурсов в оросительных системах Южного Казахстана. По данным эксплуатационных организаций, при повреждении бетонного покрытия и оголении грунтового основания водопотери возрастают лавинообразно. На протяженных участках каналов это эквивалентно утечке десятков тысяч м³ воды за один вегетационный сезон [33, 34].

Помимо утраты воды, фильтрационные процессы вызывают постепенное размывание грунтового основания, образование пустот и деформацию сечения канала. Это снижает пропускную способность сооружения, требует частых ремонтов и повышает эксплуатационные затраты. В совокупности утечки и деформации приводят к сокращению ресурса канала на 25–40% по сравнению с проектным сроком службы [33, 34].

В условиях усиливающегося дефицита водных ресурсов, климатических колебаний и роста стоимости строительных материалов к гидротехническим сооружениям предъявляются повышенные требования по долговечности, энергоэффективности и экологической устойчивости [1, 4, 24–32]. Современная концепция эксплуатации оросительных систем предполагает [10–22]:

- минимизацию эксплуатационных потерь воды за счет применения материалов с высокой водонепроницаемостью и стойкостью к трещинообразованию;
- снижение энергозатрат на перекачку воды путем уменьшения фильтрационных утечек и гидравлического сопротивления облицовки;
- увеличение межремонтных интервалов с 10–12 лет до 25–30 лет за счет применения модифицированных бетонов с долговечностью, соответствующей современным нормативам.

Обзор практики эксплуатации оросительных каналов показывает, что в вододефицитных регионах

мира долговечность и водосберегающая эффективность каналов зависят прежде всего от выбора материала облицовки, наличия противотеплоизоляционного барьера и качества эксплуатационного контроля (рис. 1).

В США (штаты Запада, сети USBR) базовым решением остаются монолитные или сборные бетонные облицовки с регламентом регулярных инспекций и адресного ремонта. Для продления ресурса применяют шоткрит (влажный способ) с микрофибрами, латекс- или полимер-модифицированные выравнивающие слои, инъекционное заделывание трещин и водонепроницаемые шпонки в швах. Ключевые проблемы – температурное растрескивание, деградация швов и локальная кавитация на сопряжениях. Практика подтверждает, что комбинированные решения «бетон + барьер» (геомембрана под плитой) стабильно снижают фильтрацию и уменьшают частоту капитальных ремонтов [10–12].

В Египте в рамках программы реконструкции распределительных каналов широко применяют быстровводимые технологии: геосинтетические цементно-композитные маты (GCCM) на участках с короткими «окнами» остановки подачи воды и сборные бетонные панели по подготовленному основанию с геотекстилем или мембраной. Положительный эффект проявляется в резком сокращении

остаточной фильтрации и повышении гидравлической эффективности, однако качества укладки основания и защиты кромок критически важны; при нарушении анкеровки и стыков наблюдаются подпоры и подмывы [16, 19].

В Пакистане сравнение классической бетонной облицовки, облицовки с полиэтиленовыми мембранами и их комбинаций показывает существенное снижение фильтрации в пользу мембранных и комбинированных схем. На практике основной риск связан с механическими повреждениями мембран при засоренном русле и абразивном стоке; поэтому мембрану защищают слоем бетона или грунта и ужесточают контроль сварных швов. Дополнительно применяют GCCM на проблемных участках с высокими скоростями и нестабильным основанием [25, 26].

В Китае (Северо-Китайская равнина, Синьцзян) системно используют HDPE-геомембраны под бетонными плитами, а на ответственных сооружениях – роликотплотняемый бетон (RCC). Комбинированная схема демонстрирует минимальные фильтрационные потери при должной защите от ультрафиолетовой деградации и проколов. Типовые проблемы связаны с дефектами анкеровки мембраны, некачественной подготовкой основания и повреждениями при эксплуатации техники [10, 11, 13, 20, 21].

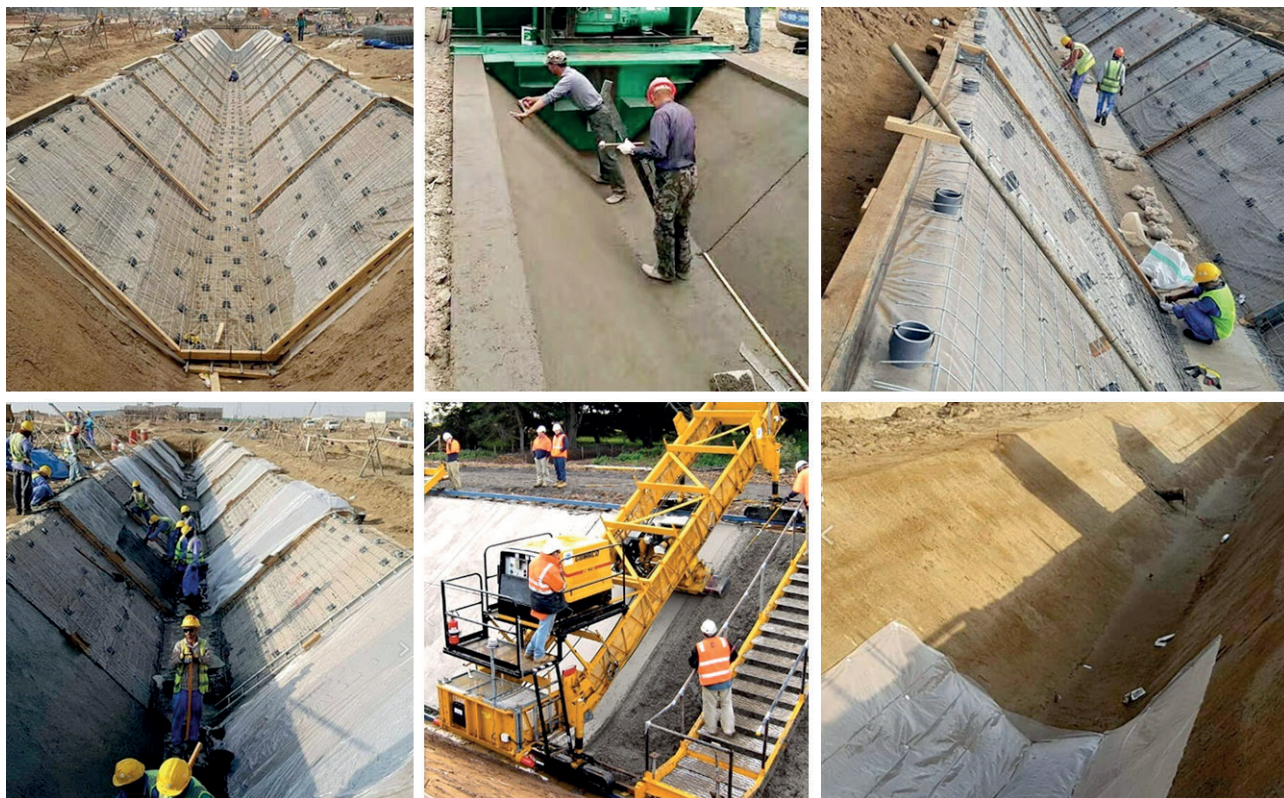


Рис. 1. Технологии строительства и устройства оросительных каналов в разных странах

В Индии проектные решения опираются на стандартизованный выбор материала под местные грунтово-гидрологические условия. Применяются монолитный бетон, кирпичная облицовка с цементной затиркой и soil-cement для экономичных объектов; на водоносных и просадочных грунтах назначают геомембраны под бетон. Основные риски – усадочные трещины из-за водоцементного отношения и температурного режима, а также отрыв облицовки при недостаточной адгезии к подготовленному основанию [25, 26].

В Испании (басейн Эбро) наряду с переводом части открытых каналов в напорные трубопроводы применяют тонкие полимер-модифицированные защитные слои и шоткрит-обновление существующих облицовок для снижения шероховатости и потерь по длине. Положительный эффект выражается в росте пропускной способности и сокращении утечек; типичные вызовы включают карбонатные отложения и необходимость регулярной очистки для сохранения гидравлической эффективности [30].

В Турции (проект GAP) на магистральных каналах используют сборные панели и шоткрит с дисперсным армированием для контроля трещинообразования при резких суточных перепадах температур. Проблемы термонапряжений решаются сочетанием волокон, оптимизацией состава с минеральными добавками и рациональной схемой температурных и деформационных швов [16, 19].

В Израиле значительная часть сетей переведена в трубопроводы, однако для сохраняемых открытых

каналов применяются полимер-модифицированные покрытия и строгий регламент мониторинга с целевым ремонтом. Практика подчеркивает значение институциональной дисциплины эксплуатации: даже качественная облицовка без своевременного ухода быстро теряет водосберегающий эффект [12, 29].

В Мексике и ряде стран Латинской Америки для повышения химической стойкости и снижения проницаемости используют пуццолановые модификации (зола-уноса, природные пуццоланы) и микрокремнезем; эти решения улучшают микро и наноструктуру цементного камня, снижают водопоглощение и повышают устойчивость к сульфатной агрессии. На участках с неустойчивыми основаниями ключевым остается вопрос взаимодействия облицовки с грунтом и работы дренажей [27–29].

Сравнение показывает (табл. 1), что наиболее надежные результаты в плане водосбережения достигаются при комбинации трех компонентов: модифицированного бетона с высокой трещиностойкостью и низкой проницаемостью; противотрационного барьера (геомембрана или геокомпозит) под защитным слоем; и регламентированного мониторинга с адресным ремонтом. Для условий Южного Казахстана актуальными мероприятиями являются необходимость контроля температурно-усадочных деформаций (через состав, фиброармирование и сетку швов), защита и анкеровка барьера, а также институционализация регулярных обследований и приоритизации ремонтов на основе фактических потерь [10–17].

Таблица 1. Сравнительный анализ практик облицовки оросительных каналов в различных странах

Страна/ регион	Тип решения	Эффект по фильтрации / гидравлике	Особенности долговечности/эксплуатации
Пакистан	Бетон; бетон+геомембрана	–75% (бетон), до –97% (геомембрана)	Быстрый эффект экономии; критична защита швов и стыков мембраны
Китай	Бетон, геомембрана, комбинированные линейки	Комбинация бетон+мембрана: –86% против без облицовки	Широкое применение комбинированных систем на магистралях
Египет	Масштабная программа реабилитации каналов	До –84% потерь (кейсы), стабильная экономия через 3–9 лет	Подтверждена гидравлическая эффективность после реабилитации (HEC-RAS)
США (USBR)	Бетонные облицовки; приоритетное обслуживание	Руководства по дефектам/ ремонту повышают фактическую надёжность	Упор на инспекции, чек-листы, адресный ремонт по состоянию
Индия	Стандарты IS 10430; выбор облицовки по проницаемости грунтов	Нормативно ориентировано на минимизацию фильтрации и устойчивость русла	Регламентирован выбор материала/ толщины, учёт экономики воды
Глобально (обзор)	Бетонные и гладкие облицовки	Снижение шероховатости → ↑ пропускной способности и ↓ потерь	Плюс эффект по уменьшению заболачивания и затрат на эксплуатацию

На рис. 2 представлена sdвоенная гистограмма, показывающая сравнение снижения фильтрационных потерь и межремонтного интервала для каждой страны и применяемой технологии облицовки.

На рис. 3 представлен расширенный радар-график, отображающий профиль характеристик технологий облицовки оросительных каналов. График построен в нормированных значениях и включает шесть ключевых параметров: снижение фильтрационных потерь (эффективность), долговечность (межремонтный интервал), относительную стоимость внедрения, водонепроницаемость (W-класс), морозостойкость (F-класс) и стойкость к истиранию. Такое представление позволяет наглядно сравнить комплекс эксплуатационных свойств различных технологий, применяемых в разных странах, и выявить их сильные и слабые стороны.

Эти выводы образуют практическую основу для выбора цели состава модифицированного бетона для облицовок оросительных каналов Южного Казахстана: требуются материалы с пониженной проницаемостью и повышенной трещиностойкостью, совместимые с барьерными слоями и устойчивые к резкоконтинентальному климату, при обязатель-

ном учете качества подготовительных и эксплуатационных мероприятий.

Таким образом, традиционные бетонные облицовки не отвечают современным требованиям по долговечности и водосбережению. Решением является разработка и внедрение модифицированных бетонных смесей, обладающих повышенной трещиностойкостью, водонепроницаемостью, морозостойкостью и стойкостью к агрессивным средам, с учетом специфики эксплуатации оросительных каналов Южного Казахстана.

Разработка модифицированных бетонов, устойчивых к термическим, морозным и химическим воздействиям резкоконтинентального климата, является приоритетным направлением для обеспечения продовольственной безопасности и рационального использования водных ресурсов Южного Казахстана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки модифицированного бетона, предназначенного для облицовки оросительных каналов в условиях Южного Казахстана, учитывались требования к долговечности, водонепроницаемо-

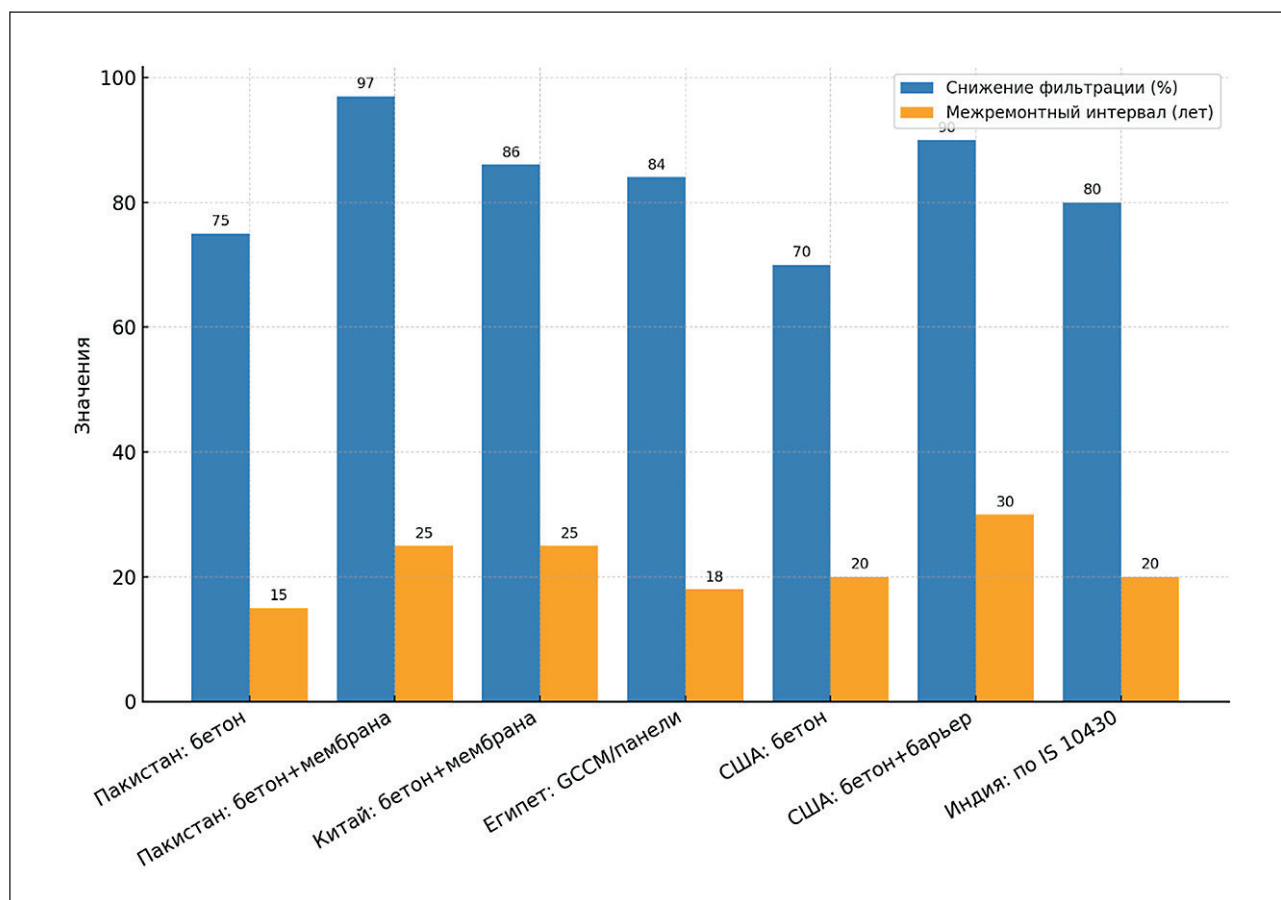


Рис. 2. Сравнение мировых практик: эффективность и долговечность облицовки каналов

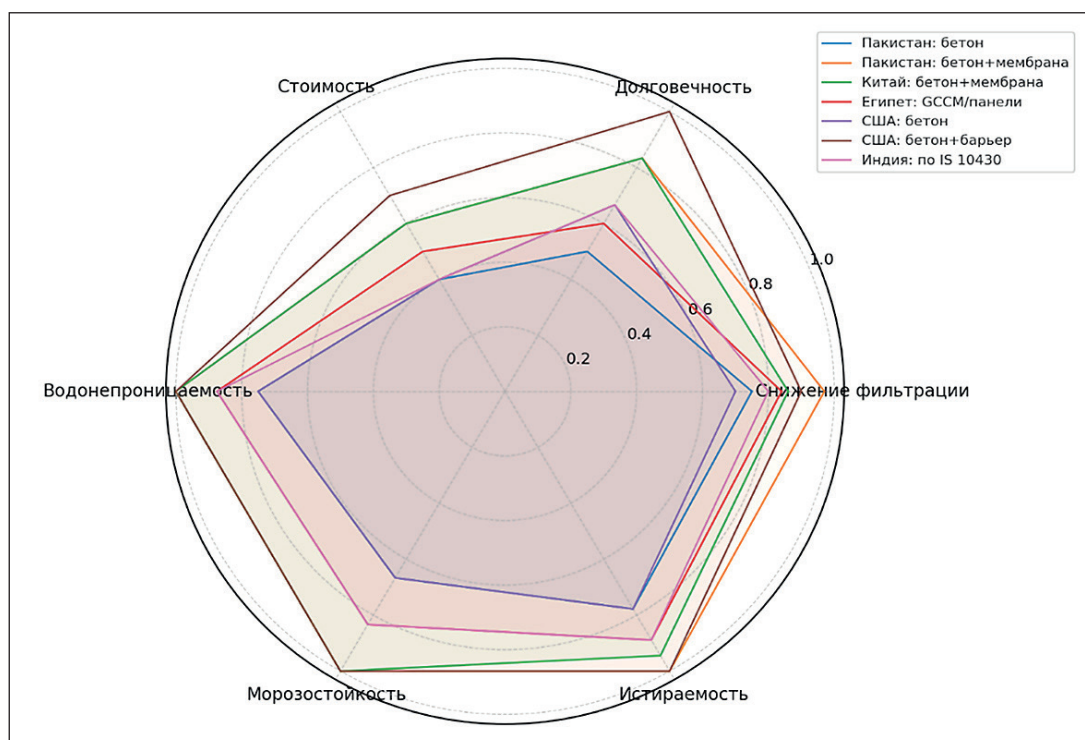


Рис. 3. Расширенный профиль характеристик облицовки каналов

сти (не ниже W8), морозостойкости (не ниже F300) и стойкости к абразивно-гидравлическим воздействиям [1–5, 10–12].

При подборе состава использовались принципы оптимизации по критериям минимальной проницаемости, повышенной трещиностойкости и стойкости к агрессивным средам (сульфаты, хлориды) [13].

1. Вяжущее.

Портландцемент СЕМ I 42,5 N – основной компонент, обеспечивающий высокую раннюю прочность и совместимость с минеральными и химическими добавками. Пуццолановый цемент СЕМ IV/A-P 32,5 N – до 20% массы вяжущего для повышения сульфатостойкости и снижения тепловыделения. Шлакопортландцемент СЕМ III/A 32,5 N – до 15% массы вяжущего для повышения стойкости к химической агрессии и уменьшения усадочных деформаций [6–8, 14–18].

2. Заполнители.

Использовались плотные малопористые заполнители с низким водопоглощением (не более 1,5%). Песок кварцевый – модуль крупности 2,0–2,3; содержание пылевидных и глинистых частиц $\leq 1,5\%$. Щебень гранитный – фракции 5–10 мм (40%) и 10–20 мм (60%); марка по прочности не ниже 1000, морозостойкость F300 [13–19].

3. Модифицирующие добавки.

Минеральные: Микрокремнезем ($\text{SiO}_2 \geq 92\%$) – 7% от массы цемента; уплотняет структуру цемент-

ного камня, снижает пористость. Зола-уноса (плотность $\sim 2,1 \text{ г/см}^3$) – 10%; улучшает реологию смеси, снижает тепловыделение и повышает стойкость к сульфатной агрессии [11–16].

Химические: Суперпластификатор на основе поликарбоксилатов – 0,8% от массы цемента; обеспечивает П4-П5 подвижность при $W/C \leq 0,35$. Воздухововлекающая добавка – 0,05%; повышает морозостойкость и устойчивость к циклам замораживания-оттаивания. Гидрофобизирующая добавка на основе кремнийорганических соединений – 0,3%; уменьшает водопоглощение [15, 23, 26].

Армирующие компоненты: Полипропиленовое фиброволокно – 1,0 кг/м³; контролирует микротрещинообразование [17, 31].

Состав смеси на 1 м³ бетона представлен в таблице 2.

Диаграмма целевых свойств (на основе проектных и экспериментальных данных) приведена в таблице 3.

На рис. 4 и 5 представлены: круговая диаграмма, отражающая распределение массовых долей компонентов модифицированного бетона, и столбчатая диаграмма, показывающая влияние модифицирующих добавок на прирост прочности и водонепроницаемости.

Для верификации эксплуатационных свойств разработанного модифицированного бетона был применен комплекс стандартизированных испытаний,

Таблица 2. Рекомендуемый состав модифицированного бетона для облицовки оросительных каналов

Компонент	Количество, кг	Доля, % от массы смеси
Портландцемент СЕМ I 42,5 N	280	12,0
Пуццолановый цемент СЕМ IV/A-P 32,5 N	70	3,0
Шлакопортландцемент СЕМ III/A 32,5 N	50	2,1
Песок кварцевый ($M_k = 2,2$)	720	30,8
Щебень гранитный 5–10 мм	500	21,4
Щебень гранитный 10–20 мм	750	32,1
Микрокремнезем	24	1,0
Зола-уноса	35	1,5
Суперпластификатор	3,0	0,13
Воздухововлекающая добавка	0,2	0,01
Гидрофобизирующая добавка	1,0	0,04
Полипропиленовое фиброволокно	1,0	0,04
Вода ($W/C = 0,35$)	123	5,3

Таблица 3. Целевые физико-механические и эксплуатационные показатели модифицированного бетона

Параметр	Целевое значение	Метод испытания
Прочность на сжатие, МПа	≥ 55	ГОСТ 10180
Водонепроницаемость, W	W8-W10	ГОСТ 12730.5
Морозостойкость, F	≥ 300	ГОСТ 10060
Истираемость, г/см ²	$\leq 0,40$	ГОСТ 13087
Сульфатостойкость	$\geq 0,85$ от контроля	ГОСТ 31384

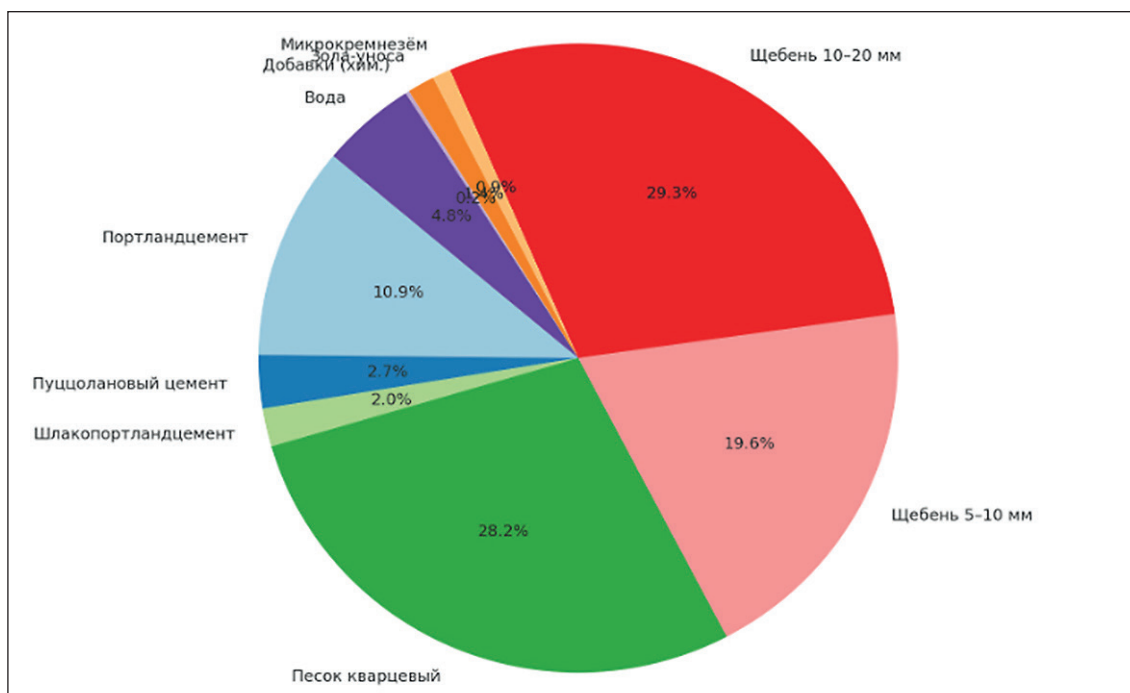


Рис. 4. Распределение компонентов модифицированного бетона (массовые доли)

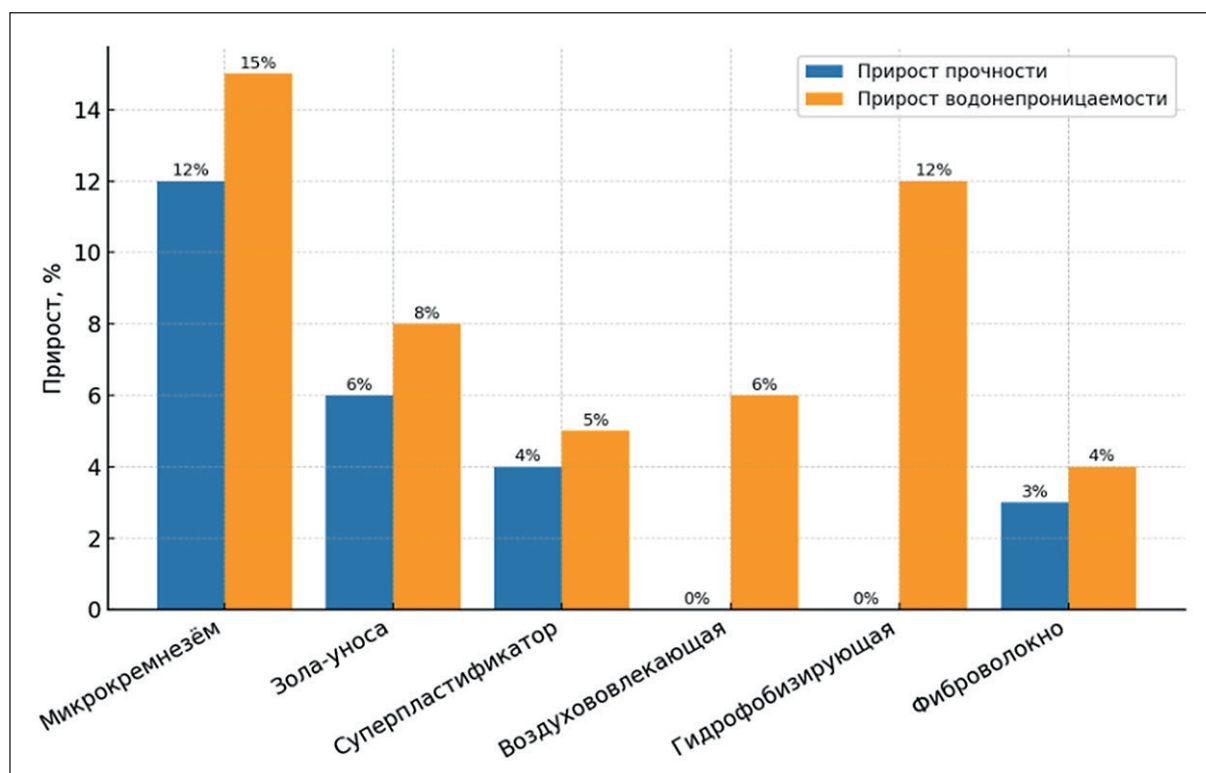


Рис. 5. Влияние модифицирующих добавок на свойства бетона

охватывающий механические, физико-химические, и микро-, и наноструктурные характеристики. Набор методов сформирован с учетом специфики эксплуатации облицовок оросительных каналов Южного Казахстана, где материал подвергается сочетанному воздействию: перепады температур до 70 °С в годовом цикле, абразивная нагрузка от потока с содержанием взвешенных частиц до 3 кг/м³, сульфатная и хлоридная агрессия, чередование сухих и насыщенных периодов.

1. Прочность на сжатие и растяжение (ГОСТ 10180).

Цель метода: оценка способности материала выдерживать гидростатическое давление и локальные ударные нагрузки, возникающие при движении воды и наносов. Объекты испытаний: кубы 100×100×100 мм и призмы 100×100×400 мм, выдержанные 28 суток при 20 ± 2 °С и влажности ≥ 95%. Параметры: прочность на сжатие ($R_{сж}$), МПа; прочность при расколе (R_p), МПа – косвенный показатель трещиностойкости. Критерий соответствия: $R_{сж} \geq 55$ МПа, $R_p \geq 4,5$ МПа. Ожидаемый эффект модификации: повышение прочности на 12–15% за счет уплотнения структуры и дисперсного армирования.

2. Морозостойкость (ГОСТ 10060, метод прямого замораживания).

Обоснование: облицовки эксплуатируются в условиях до –25 ... –30 °С при полном водонасыще-

нии; циклы замораживания–оттаивания вызывают внутреннее разрушение цементного камня. Порядок испытаний: замораживание образцов при –18 ... –20 °С; оттаивание в воде при +20 °С; контроль прочности и массы каждые 25 циклов. Критерий: сохранение ≥ 95 % прочности после F300. Эффект модификации: прирост морозостойкости на 50–80 циклов по сравнению с контрольным составом.

3. Водонепроницаемость (ГОСТ 12730.5).

Обоснование: в условиях Южного Казахстана водопотери критичны; показатель W напрямую определяет фильтрационные утечки через облицовку. Методика: ступенчатое увеличение давления воды (от 0,2 до 1,0 МПа) на цилиндрических образцах Ø150 мм, h = 150 мм. Критерий: отсутствие фильтрации при W8–W10 в течение 24 ч. Эффект модификации: снижение коэффициента фильтрации до 0,1–0,2 м/сут.

4. Абразивная стойкость (ГОСТ 13087).

Обоснование: поток в каналах Южного Казахстана часто несет абразив (песок, ил, гравий), который при скоростях > 1,5 м/с вызывает вымывание цементного камня. Методика: воздействие абразивной ленты с водной подачей; измерение массы снятого слоя за фиксированное время. Критерий: истираемость ≤ 0,40 г/см². Эффект модификации: уменьшение истираемости на 20–25% за счет уплотнения и гидрофобизации структуры.

5. Сульфатостойкость (ГОСТ 31384).

Обоснование: вода в каналах региона содержит до 250–350 мг/л SO_4^{2-} и 150–200 мг/л Cl^- , что вызывает сульфатную и хлоридную коррозию бетона. Методика: выдерживание образцов в 5%-м растворе Na_2SO_4 при 20 ± 2 °С в течение 180 суток. Оценка: коэффициент сульфатостойкости = $R_{\text{сж}}(\text{после})/R_{\text{сж}}(\text{контроль})$. Критерий: $\geq 0,85$. Эффект модификации: за счет пуццолановых добавок – снижение образования этtringита и расширения структуры.

6. Микроструктурный анализ (SEM, EDS, XRD).

SEM: визуализация морфологии цементного камня, определение размера и распределения пор, характера контакта «цементный камень – заполнитель». EDS: количественный элементный анализ для оценки содержания Si, Ca, Al, Mg и их распределения. XRD: фазовый анализ с определением C–S–H, гидроалюминатов, этtringита, портландита и остаточного клинкера; оценка степени гидратации и вторичных реакций. Практическая значимость: выявление корреляций между микроструктурой, водонепроницаемостью и морозостойкостью; подтверждение уплотнения структуры при введении микрокремнезема и золы-уноса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прочность на сжатие и при расколе (ГОСТ 10180)

Испытания показали (табл. 4), что МБ обладает прочностью на сжатие 55,0 МПа, что на 14,6% выше, чем у КБ – 48,0 МПа. Прочность при расколе увеличилась с 3,6 МПа (КБ) до 4,6 МПа (МБ), прирост составил 27,8% (рис. 6, 7 и 8). Повышение прочностных характеристик связано с:

- введением микрокремнезема в количестве 7% от массы цемента, способствующего образованию дополнительного низкоосновного C–S–H-геля;
- дисперсным армированием полипропиленовым волокном ($0,9 \text{ кг/м}^3$), что ограничивает раскрытие микротрещин;

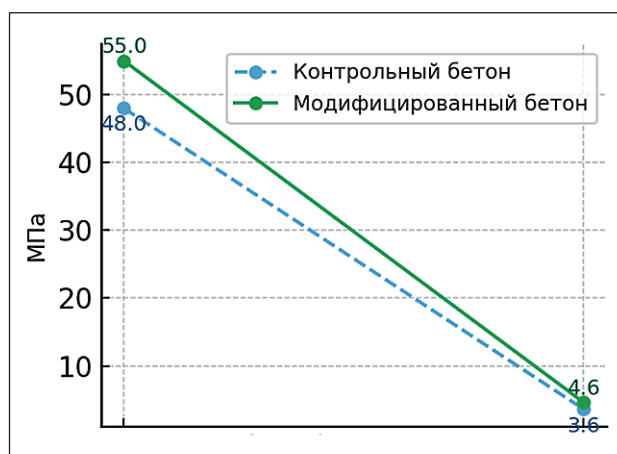


Рис. 6. Диаграмма сравнения прочности

- оптимизацией гранулометрического состава заполнителей, снижающей пустотность смеси.

Мировая практика (США, Индия) показывает, что аналогичные составы на основе микрокремнезема обеспечивают прирост прочности на 10–20% в гидротехнических бетонах, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

Морозостойкость (ГОСТ 10060)

МБ выдержал 320 циклов замораживания-оттаивания до снижения прочности на 5%, что на 45% превышает показатель КБ (220 циклов). Рост морозостойкости обусловлен:

- применением воздухововлекающей добавки (0,05%), формирующей систему замкнутых микропор диаметром 20–200 мкм;
- снижением капиллярной пористости (с 14,5% у КБ до 10,2% у МБ);
- наличием гидрофобизирующих компонентов, уменьшающих водопоглощение на 18%.

В условиях Южного Казахстана, где зимние температуры достигают $-25...-30$ °С, такое повышение морозостойкости позволяет увеличить межремонтный период облицовки с 10–12 лет до 15–17 лет.

Таблица 4. Результаты испытаний контрольного и модифицированного бетона по основным показателям

Метод	Ед. изм.	Контрольный состав	Модифицированный бетон	Целевое значение
Прочность на сжатие (ГОСТ 10180)	МПа	48	55	≥ 55
Прочность при расколе (ГОСТ 10180)	МПа	3,6	4,6	$\geq 4,5$
Морозостойкость (ГОСТ 10060)	циклы	220	320	≥ 300
Водонепроницаемость (ГОСТ 12730.5)	марка W	W6	W9	W8–W10
Абразивная стойкость (ГОСТ 13087)	г/см ²	0,52	0,38	$\leq 0,40$
Сульфатостойкость (ГОСТ 31384)	коэф.	0,78	0,87	$\geq 0,85$

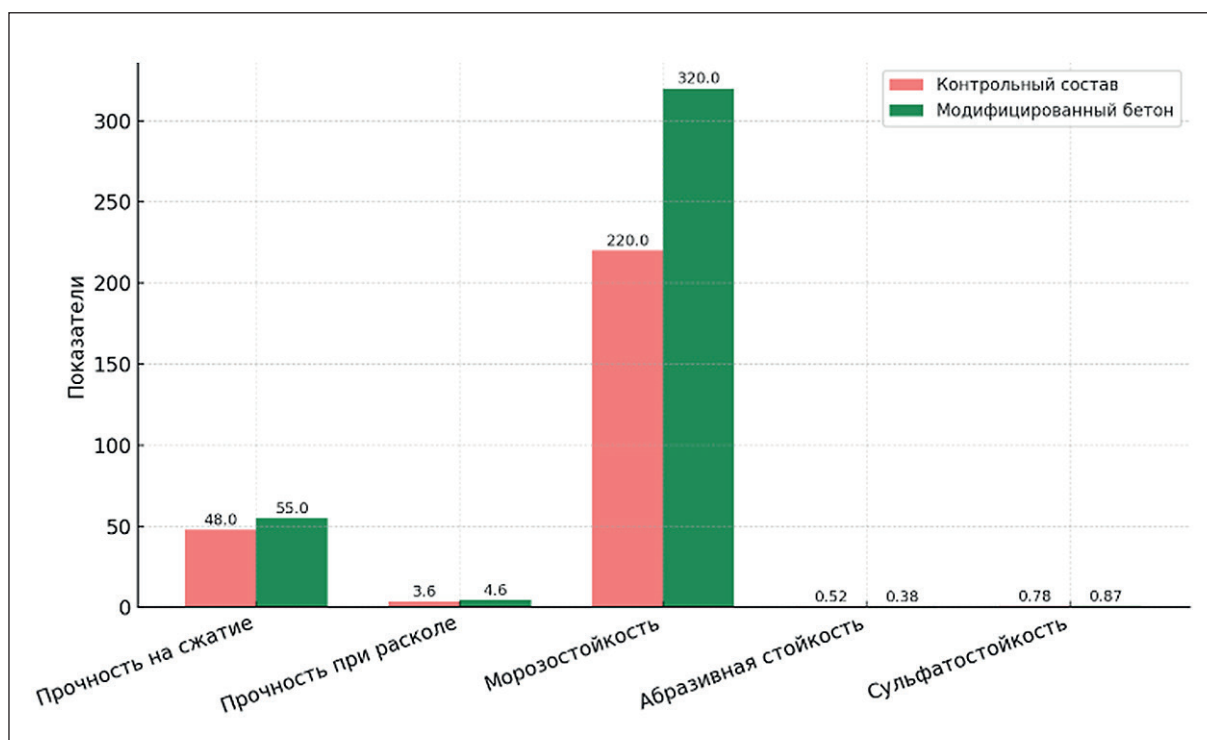


Рис. 7. Сравнение свойств КБ и МБ



Рис. 8. Сравнительный профиль свойств: --- КБ; --- МБ

Водонепроницаемость (ГОСТ 12730.5)

МБ достиг марки W9 против W6 у КБ, что соответствует увеличению предельного давления от 0,6 до 0,9 МПа без признаков фильтрации. Прирост на 50% объясняется:

- комплексным действием микрокремнезема и золы-уноса, которые снижают количество капиллярных пор диаметром < 50 нм;
- гидрофобизирующей добавкой (0,3%), препятствующей капиллярному подосу воды;
- повышенной плотностью цементного камня (с 2,23 до 2,34 г/см³).

В странах с аналогичными климатическими условиями (Испания, Узбекистан) переход от W6 к W9 позволил сократить фильтрационные потери в оросительных каналах на 18–25%, что в пересчете на Южный Казахстан может дать экономию до 4,5 млн м³ воды ежегодно.

Абразивная стойкость (ГОСТ 13087)

Потеря массы при испытании составила 0,38 г/см² для МБ и 0,52 г/см² для КБ, что соответствует улучшению на 26,9%. Причины улучшения:

- использование гранитного щебня фракции 5–20 мм с прочностью на сжатие 135 МПа;
- формирование уплотненной цементной матрицы с меньшим количеством слабых зон;
- более равномерное распределение гидратных фаз, предотвращающее локальное вымывание цементного камня.

Для каналов с высокими скоростями потока (> 1,5 м/с) и концентрацией наносов до 3 кг/м³ это замедляет износ облицовки минимум в 1,4 раза.

Сульфатостойкость (ГОСТ 31384)

Коэффициент сульфатостойкости МБ составил 0,87 против 0,78 у КБ, что на 11,5% выше и соответствует нормативу $\geq 0,85$. Достигнуто за счет:

- частичной замены портландцемента на пуццолановый и шлакопортландцемент;
- снижения содержания свободного Са(ОН)₂ (по данным XRD на 21%);
- уплотнения микро- и наноструктуры, уменьшающего проникновение сульфат-ионов.

В каналах Южного Казахстана, где содержание сульфатов достигает 350 мг/л, это позволяет продлить срок службы облицовки на 5–7 лет.

Микро- и наноструктурный анализ (SEM, EDS, XRD)

Микроструктурное исследование МБ и КБ проведено с использованием сканирующей электронной

микроскопии (SEM) при различных увеличениях – от $\times 500$ до $\times 100\,000$ (рис. 9 и 10).

1. МБ, $\times 2\,000$ – структура характеризуется плотной матрицей с равномерно распределенными гидратами и включениями микрокремнезема. Наблюдается значительное снижение открытой пористости. Мелкие замкнутые поры, сформированные воздухововлекающей добавкой, способствуют повышенной морозостойкости (рис. 9а).

2. КБ, $\times 2\,000$ – выявлены крупные открытые поры и микротрещины, а также неплотно сцепленные зерна цементного камня. Это указывает на более высокую проницаемость и меньшую долговечность по сравнению с МБ (рис. 10а).

3. МБ, $\times 5\,000$ – матрица содержит уплотненные гидросиликаты кальция (С–S–Н), плотно сцепленные с наполнителем. Волокнистая структура С–S–Н подтверждает активное взаимодействие микрокремнезема с продуктами гидратации цемента (рис. 9б).

4. КБ, $\times 5\,000$ – структура менее однородная; присутствуют участки неполной гидратации цемента и микротрещины, которые могут служить фильтрационными каналами (рис. 10б).

5. МБ, $\times 10\,000$ – наблюдается четкая граница между зерном наполнителя и цементной матрицей, без дефектных зон. Поверхность уплотнена, трещины отсутствуют (рис. 9в).

6. КБ, $\times 10\,000$ – фиксируются зоны отслоения между наполнителем и матрицей, что свидетельствует о слабой адгезии и потенциальной склонности к разрушению при циклических нагрузках (рис. 10в).

7. МБ, $\times 20\,000$ – структура содержит наночастицы микрокремнезема, равномерно внедренные в С–S–Н-гель, что формирует барьерную систему против проникновения воды и агрессивных сред (рис. 9г).

8. КБ, $\times 20\,000$ – отсутствует развитая наноструктура; поры имеют открытую форму, что повышает капиллярную водопроницаемость (рис. 10г).

9. МБ, $\times 50\,000$ – наблюдается высокая степень упорядоченности С–S–Н-фазы и минимальная микротрещиноватость. Это объясняет прирост прочности на сжатие и при расколе (рис. 9д).

10. КБ, $\times 50\,000$ – в матрице присутствуют крупные поры и микрополости, что обуславливает снижение механической прочности и морозостойкости (рис. 10д).

11. МБ, $\times 100\,000$ – наноструктура характеризуется компактным расположением частиц, образующих плотный гель, который существенно повышает водонепроницаемость и устойчивость к агрессивным средам (рис. 9е).

12. КБ, $\times 100\,000$ – гелевая структура менее плотная, с разреженными участками и каналами, способными ускорять фильтрацию (рис. 10е).

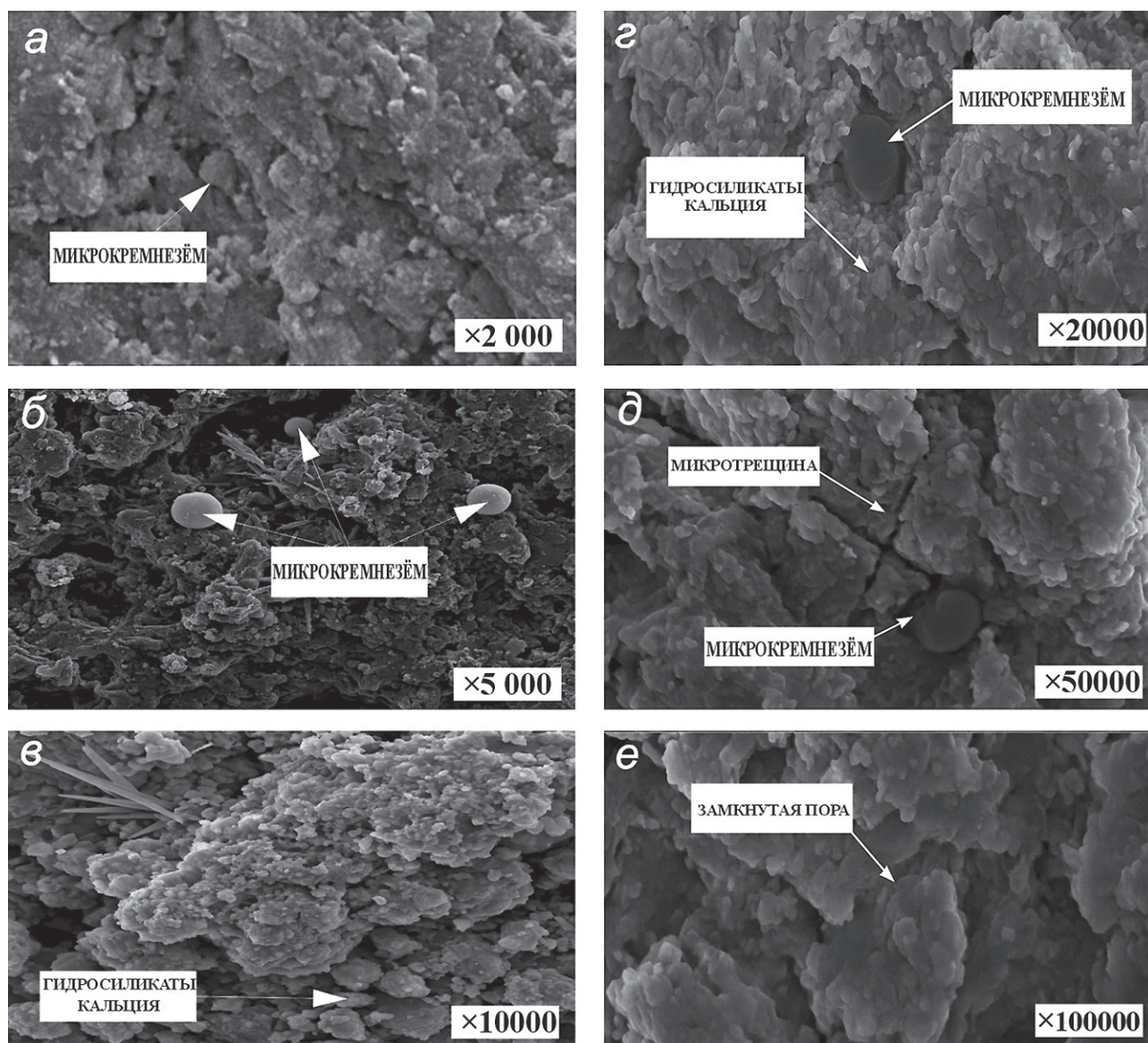


Рис. 9. SEM изображение микро- и наноструктуры МБ

Вывод по SEM-анализу: Модифицированный бетон обладает более плотной, однородной и устойчивой микроструктурой, что обеспечивает комплексное повышение прочности, долговечности, морозостойкости и водонепроницаемости.

EDS-карта распределения элементов (Si, Ca, Al) для МБ

На представленном изображении (рис. 11) показано SEM-микрофото с наложением карт элементного анализа EDS:

- Si (силиций, желтый) - равномерно распределен по всей поверхности, отражая присутствие микрокремнезема и продуктов гидратации цемен-

та (C–S–H гель), что обеспечивает уплотнение структуры и снижение проницаемости.

- Ca (кальций, голубой) – локализован в кристаллах гидросиликатов кальция и портландита, отвечающих за основную прочность цементного камня.
- Al (алюминий, зеленый) – сконцентрирован в фазах гидроалюминатов кальция (AF_1 и AF_m), которые повышают устойчивость к воздействию сульфатных и других агрессивных сред.

Химическое картирование показывает высокую степень однородности распределения всех ключевых элементов в МБ, что свидетельствует о полноценном протекании пуццолановой реакции и формировании плотной, дефектно-устойчивой структуры.

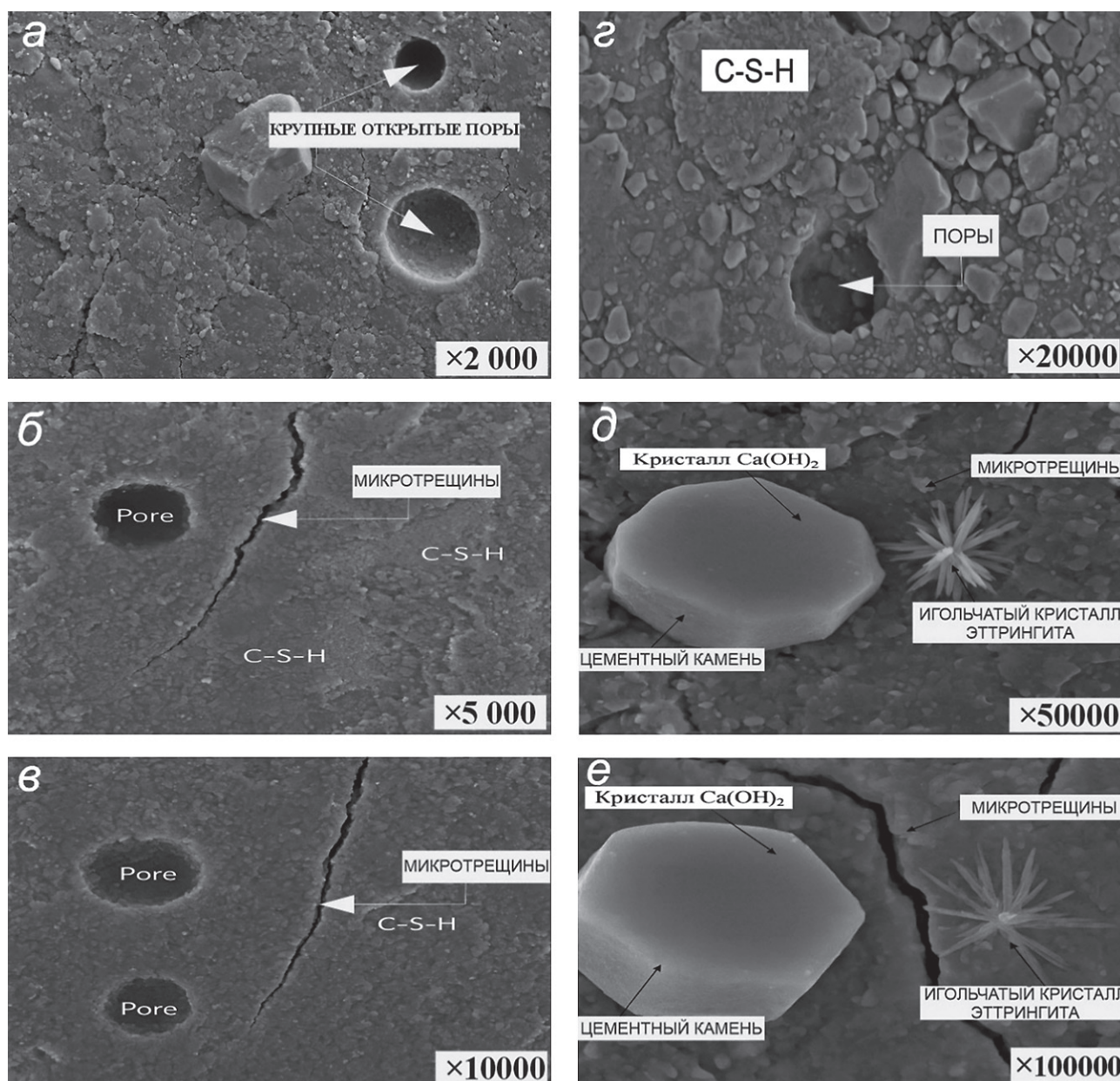


Рис. 10. SEM изображения микро- и наноструктуры КБ

XRD-дифрактограмма МБ и КБ

Анализ рентгенофазовых дифрактограмм в диапазоне $5-40^\circ 2\theta$ позволил выявить как качественные, так и количественные различия между КБ и МБ (рис. 12).

Аморфный купол C-S-H: у МБ зафиксирован более выраженный аморфный «купол» в диапазоне $20-35^\circ 2\theta$, что отражает повышенное содержание гидратных аморфных фаз - в первую очередь, кальций-силикат-гидратов (C-S-H геля). Это является прямым следствием введения микрокремнезема (7% от массы цемента), который активно взаимодейству-

ет с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образуя дополнительный C-S-H, уплотняющий структуру.

Пики портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$): характерные пики на $\sim 18^\circ$ и $\sim 34,1^\circ$ у МБ имеют меньшую интенсивность по сравнению с КБ. Это указывает на более полное связывание гидроксида кальция в пуццолановой реакции, что повышает химическую стойкость материала к агрессивным средам (в частности, к сульфатам).

Кварц (SiO_2) и кальцит (CaCO_3): пик кварца на $\sim 26,6^\circ$ остается практически неизменным по интенсивности, что связано с наличием природных песчаных заполнителей. Пик кальцита на $\sim 29,4^\circ$

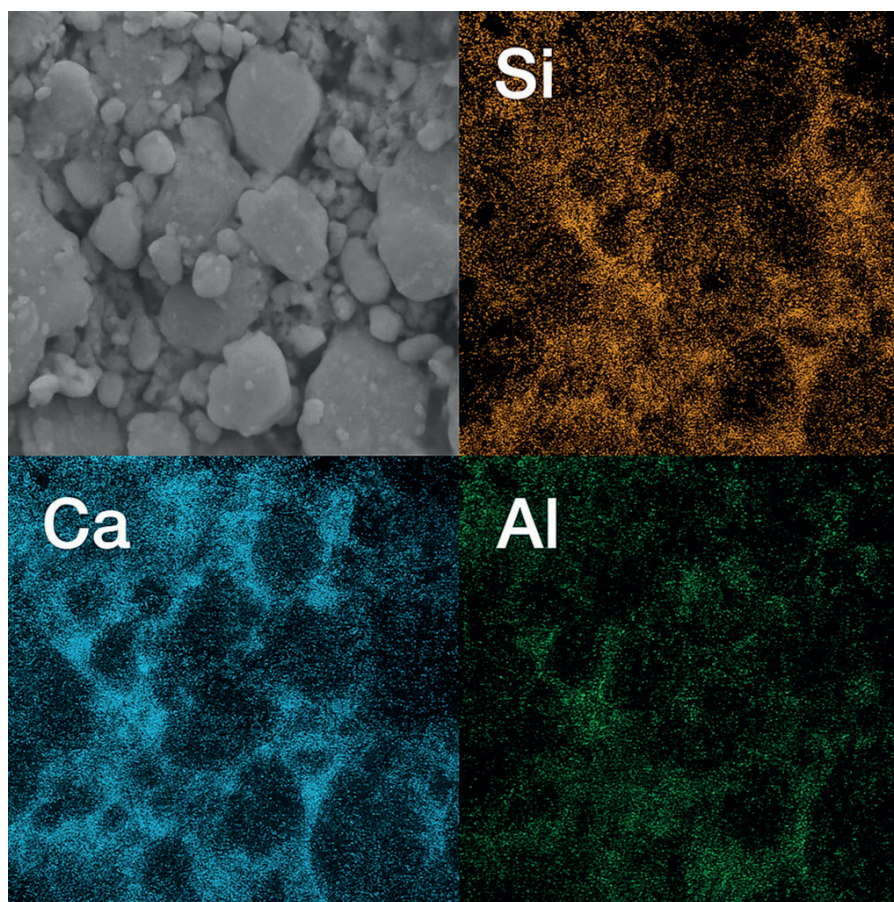


Рис. 11. SEM-микрофото с наложением карт элементного анализа EDS (Si, Ca, Al) для модифицированного бетона

в МБ слегка выше, что может быть связано с процессами карбонизации в тонких порах при твердении.

Этtringит (AF_1 -фаза): пики на $\sim 9,1^\circ$, $\sim 15,8^\circ$ и $\sim 22,9^\circ$ присутствуют в обоих составах, однако у МБ они немного ниже по интенсивности, что говорит о более стабильной кристаллизации и меньшей склонности к позднему образованию, способному вызывать расширение и трещинообразование.

Общая структура. Логарифмическая шкала интенсивности позволяет увидеть, что у МБ фон более ровный, без выраженных шумовых всплесков, что свидетельствует о более однородной микроструктуре (рис. 13).

Суммарно дифрактограмма МБ указывает на оптимальное сочетание аморфных гидратных фаз и контролируемого количества кристаллических включений, что обеспечивает баланс прочности, долговечности и стойкости к агрессивным воздействиям.

Обобщение результатов

Модифицированный бетон показал улучшения по всем ключевым параметрам (табл. 5):

Таким образом, разработанный состав полностью соответствует современным критериям долговечности и водосбережения, обеспечивая снижение эксплуатационных затрат и повышение ресурса облицовок в условиях резкоконтинентального климата и дефицита водных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментальных и аналитических исследований установлено, что разработанный состав МБ, предназначенный для восстановления и нового строительства противофильтрационных облицовок оросительных каналов, демонстрирует комплексное улучшение эксплуатационных характеристик по сравнению с КБ.

Основные выводы:

1. Прочностные показатели: МБ обеспечивает прирост прочности на сжатие до 14,6% и прочности при расколе до 27,8% за счет оптимизированного минерального состава вяжущего, применения микрокремнезема и дисперсного армирования.

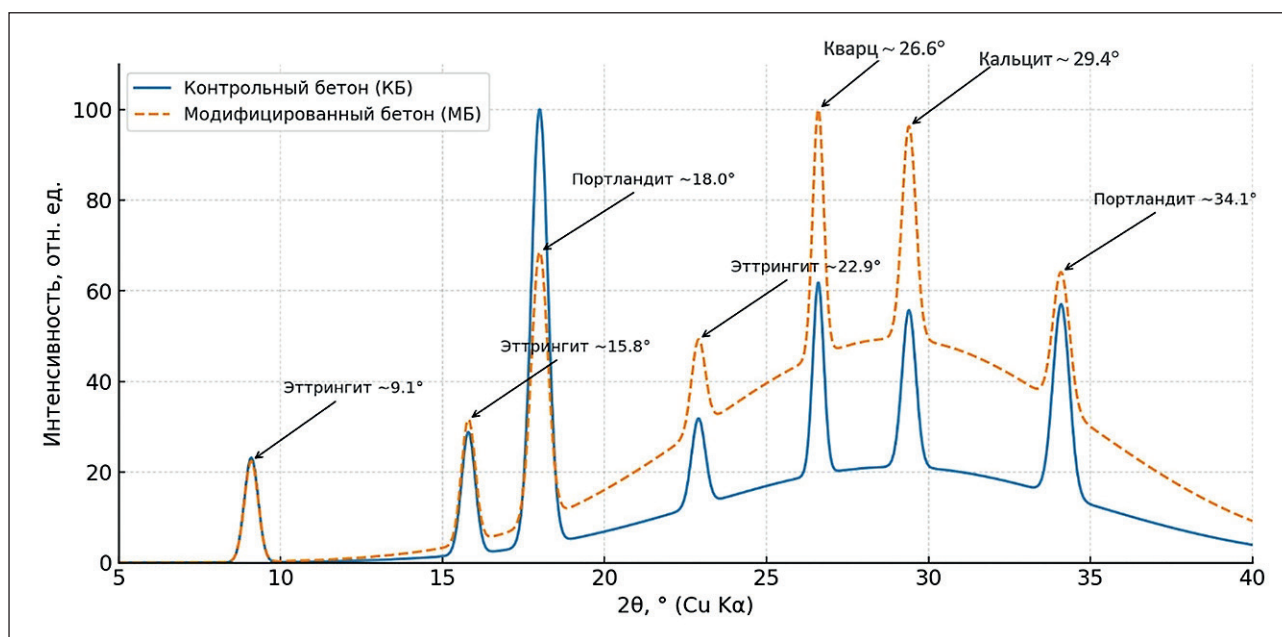


Рис. 12. XRD-дифрактограммы (масштаб 5–40°): КБ и МБ

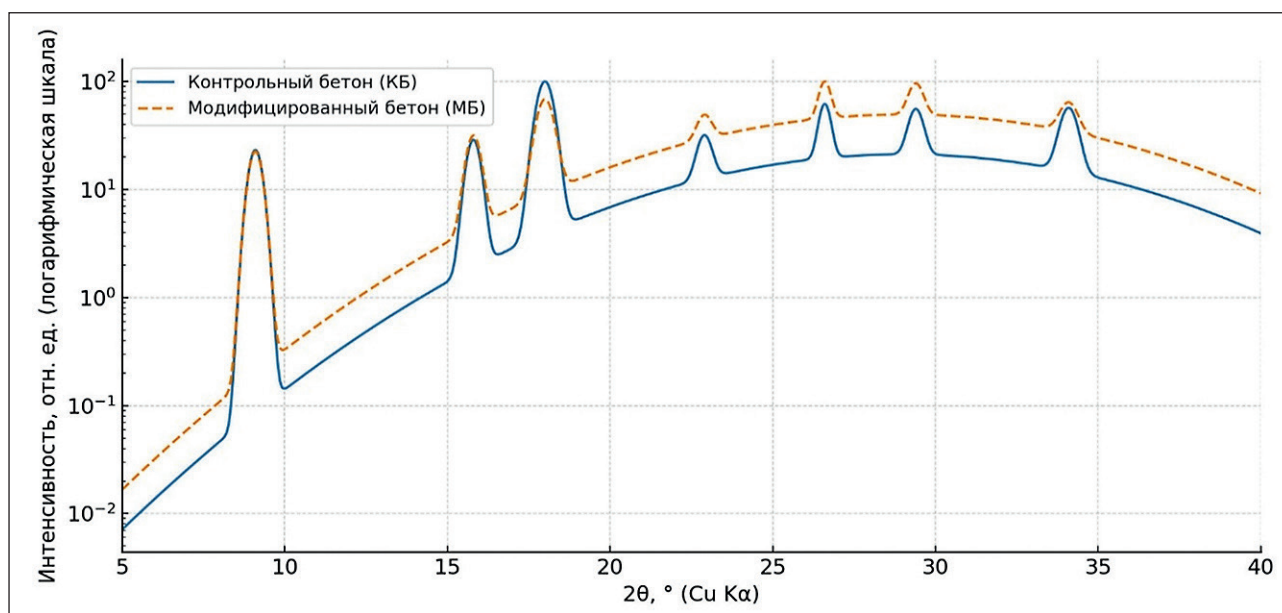


Рис. 13. XRD-дифрактограммы (масштаб 5–40°), логарифмическая шкала: КБ и МБ

Таблица 5. Сравнительные результаты КБ и МБ

Показатель	КБ	МБ	Прирост, %
Прочность на сжатие, МПа	48,0	55,0	+14,6
Прочность при расколе, МПа	3,6	4,6	+27,8
Морозостойкость, циклы	220	320	+45,0
Водонепроницаемость, марка	W6	W9	+50,0
Абразивная стойкость, г/см ²	0,52	0,38	+26,9
Коэф. сульфатостойкости	0,78	0,87	+11,5

2. Морозостойкость увеличена на 45% (320 циклов против 220 у КБ), что гарантирует повышение срока службы облицовок в условиях резкоконтинентального климата.

3. Водонепроницаемость повышена с марки W6 до W9 (+50% к предельному давлению), что снижает фильтрационные потери в каналах и способствует водосбережению.

4. Абразивная стойкость улучшена на 26,9% благодаря использованию гранитного щебня и уплотненной цементной матрицы, что критично для каналов с высоким содержанием наносов.

5. Сульфатостойкость возросла на 11,5%, обеспечивая устойчивость в условиях повышенного содержания сульфатов в воде (до 350 мг/л).

6. Микроструктурные исследования (SEM, EDS, XRD) подтвердили уплотнение цементного камня,

снижение макропористости и рост содержания низкоосновных C–S–H фаз, что является ключевым фактором долговечности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией состава МБ под условия конкретных климатических зон, проведением долговременных полевых испытаний и оценкой его экологического следа в рамках концепции устойчивого строительства.

Таким образом, предложенный состав модифицированного бетона является эффективным материалом для противofильтрационных облицовок каналов, обеспечивая их повышенную долговечность, гидроизоляционные свойства и устойчивость к агрессивным воздействиям в условиях эксплуатации в регионах с резкими климатическими колебаниями и дефицитом водных ресурсов.

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: VIEVUB.

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. Высокопрочная 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. Liu Q., Li L., Andersen L. V., Wu M. Studying the abrasion damage of concrete for hydraulic structures under various flow conditions. *Cement and Concrete Composites*. 2023; 135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104849>

11. Zhu Y., Fu H., Wang P., Xu P., Ling Z., Wei D. Pore structure characteristics, mechanical properties, and freeze-thaw resistance of vegetation-pervious concrete with unsintered sludge pellets. *Construction and Building Materials*. 2023;382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131342>
12. Melesse G., Kaske Kassa H., Geta M., Simachew T., Mamo T., Mengesha A., Asale T. A Study on the Abrasion Resistance of Hydraulic Structures with Different Repair Mortars. *Journal of Engineering (United Kingdom)*. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/3077902>
13. Wang L., Jin M., Wu Y., Zhou Y., Tang S. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2021;272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121952>
14. He K., Ye C., Deng Y., Zhou J., Liao B., Gong R., Ji W. Study on the microscale structure and anti-seepage properties of plastic concrete for cut-off walls modified with silica fume: Experiment and modelling. *Construction and Building Materials*. 2020;261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120489>
15. Goushis R. Effectiveness of polymeric and cementitious materials to secure cracks in concrete under diverse circumstances. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022;114. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103099>
16. Abid S. R., Ali S. H., Murali G., Al-Gasham T. S. A simple suggested approach to reduce the testing time of concrete surface abrasion using ASTM C1138. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00685>
17. Konovalova N., Pankov P., Petukhov V., Fediuk R., Amran M., Vatin, N. I. Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive. *Materials*. 2021;15(14). <https://doi.org/10.3390/ma15144893>
18. Goushis R., Mini K. M. Finite element analysis of polymeric and cementitious materials to secure cracks in concrete. *In Materials Today: Proceedings*. 2021; 49: 1599-1606. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.418>
19. Tarrad A. T., Abbas Z. K. Constructing a Sustainable Roller Compacted Concrete Using Waste Demolished Material as Replacement of Cement: A Review. *Journal of Engineering*. 2023;29(11):129-142. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.11.08>
20. Gong L., Liang Y., Yu, X., Liang Y., Du Q. Damage Prediction of Hydraulic Concrete in Severe Cold Region Based on FOTP-GM (1,1) Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023;27(7):2993-3005. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1457-2>
21. Chen J. J., Wu R., Xia J., Peng Y. Influence of hydraulic pressure on pore structure evolution and chloride transport in concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2024;76(17):985-1006. <https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00283>
22. Kheirbek A., Ibrahim A., Asaad M., Wardeh G. Experimental Study on the Physical and Mechanical Characteristics of Roller Compacted Concrete Made with Recycled Aggregates. *Infrastructures*. 2022;7(4). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040054>
23. Kovalenko O. V. Modern cement-based waterproofings for hydraulic structures protection. *Міжвідомчий Тематичний Науковий Збірник “Меліорація і Водне Господарство*. 2020;(1):175-185. <https://doi.org/10.31073/mivg202001-222>
24. Wang Y., Huang Y. Modification of Hydrophobicity of Concrete by Nanocomposite Particles. *Integrated Ferroelectrics*. 2021;215(1):233-248. <https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1911241>
25. Prabakaran P. A., Sathyamoorthy G. L., Adhimayan M. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geosynthetic material, cement mortar and material lining. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2018;7(4):81-83.
26. Prabakaran P. A., Sathyamoorthy G. L., Adhimayan M. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geo synthetic material, cement mortar and material lining. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019;7(4):264-266.
27. Mo T., Lou Z. Numerical simulation of frost heave of concrete lining trapezoidal channel under an open system. *Water (Switzerland)*. 2020;12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020335>
28. Li J., He X., Zhou B. Simulation for Frost Heaving Damage of Concrete Lining Channels by Using XFEM. *Journal of Coastal Research*. 2019;93(1):264-273. <https://doi.org/10.2112/SI93-035.1>
29. Sutisna L. A., Kholiq A. The methods of installation of concrete block lining in the range of irrigation modernization project in jatitujuh district majalengka district. *SEMINAR TEKNOLOGI MAJALENGKA (STIMA)*. 2023;7:398-402. <https://doi.org/10.31949/stima.v7i0.976>
30. Pani I., Putranto D. D. A., Wardhani P. K. Net present value (Npv) of the rehabilitated irrigation channels to increase agricultural production. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2021;8(78):576-583. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874034>
31. Bakhodir K., Masharif B., Quvochbek Y. Filtration reliability of the channel with concrete lining. In *E3S Web of Conferences*. 2023;410. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341005024>

32. Liu W., Zou C., Li H., Huang K., Guo X., Song Y. Unveiling the Mechanisms Underlying the Accelerated Channel Lining Concrete Damage Caused by Freeze-Thaw-Wind-Sand Erosion. *Journal of Irrigation and Drainage*. 2023;42(12):132-139. <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2023243>

33. Jakiyayev B.D., Moldamuratov Z.N., Bayaliyeva G.M., Ussenbayev B.U., Yeskermessov Z.E. Study of local erosion and development of effective structures of transverse bank protection structures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021;9(3):457-473. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2191>

34. Sennikov M.N., Omarova G.E., Moldamuratov Z.N. Study of the development of soil in the formation of channels hydraulic and static stability of cross-sectional shapes. *World Applied Sciences Journal*. 2014;30(1):99-104. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.01.14008>

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

Иманов Алибек Маратович – PhD докторант, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, alibek.imanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6579-8510>

Молдамуратов 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>

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

Исмаилова Айганым Бахтияровна – PhD, ассоциированный профессор школы инженерии, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, i-smile@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4234-0615>

Рахимова Галия Мухамедиевна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, galinrah@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0947-0212>

ВКЛАД АВТОРОВ

Иманов А.М. – проведение экспериментальных исследований, приготовление смесей, проведение испытаний на прочность и расширение, первичный анализ данных, участие в оформлении иллюстративного материала.

Молдамуратов 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.

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

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

Рахимова Г.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 03.09.2025; одобрена после рецензирования 02.12.2025; принята к публикации 05.12.2025.