



МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ И МОРОЗОСТОЙКОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ

Жылкышбаева Н.Б.¹, Смагулова М.К.^{1*}, Женисов Т.С.¹, Пиршаев Д.К.¹,
Алданазаров М.Н.¹

¹АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан

*Корреспондент автор: smagulovamariya98@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы повышения водонепроницаемости и морозостойкости гидротехнических бетонов. Проанализированы зарубежные технологии, применяемые в суровых климатических условиях Канады, Японии и Норвегии, включая использование пуццолановых и шлаковых добавок, интегральной кристаллической гидроизоляции, ультравысокопрочных волокнистых композитов (UHPFRC) и оптимизированных систем воздушных пор. Обсуждаются механизмы действия добавок, их влияние на микроструктуру бетона, долговечность и стойкость к агрессивным воздействиям, включая циклы замораживания–оттаивания и проникновение солей. Делается вывод о необходимости комплексного подхода, сочетающего технологические, материаловедческие и эксплуатационные решения, а также перспективе внедрения композитных систем с наномодификаторами и цифровых инструментов для прогнозирования ресурса конструкций в условиях Казахстана.

Ключевые слова: гидротехнический бетон, водонепроницаемость, морозостойкость, пуццолановые добавки, кристаллическая гидроизоляция.

Введение

Долговечность гидротехнических сооружений — один из ключевых факторов их безопасной и экономически эффективной эксплуатации. Плотины, шлюзы, морские волноломы, каналы и причальные сооружения подвергаются постоянному воздействию воды, перепадам температур, механическим нагрузкам и агрессивным химическим средам. В условиях климатических колебаний, характерных для северных регионов и высокогорных зон, на первый план выходят два взаимосвязанных свойства бетона — водонепроницаемость и морозостойкость.

Нарушение водонепроницаемости приводит к проникновению влаги в поры и капилляры бетона, что не только ускоряет процессы коррозии арматуры, но и создает предпосылки для разрушения материала при замерзании. В условиях циклического замораживания и оттаивания вода, находящаяся в порах бетона, кристаллизуется, увеличивается в объеме и создает внутренние напряжения, приводящие к появлению трещин и потере прочности. Со временем это может вызвать ускоренное старение конструкций, снижение их эксплуатационной надежности и даже аварийные ситуации.

В последние десятилетия в мировой строительной практике активно развиваются методы модификации бетонов с целью повышения их устойчивости к воздействию воды и низких температур. Разрабатываются и применяются химические добавки, минеральные микро- и наномодификаторы, а также комплексные минеральные вяжущие, которые

позволяют целенаправленно изменять микроструктуру цементного камня, снижать пористость и повышать плотность материала.

Особый интерес представляют зарубежные технологии, уже прошедшие испытания в реальных условиях эксплуатации. Так, в Норвегии и Канаде разработаны составы бетонов для гидротехнических объектов, успешно работающих при экстремальных морозах и высоком воздействии солей. В Японии реализованы решения для морских сооружений с применением нанодиоксида титана, обеспечивающего дополнительную защиту от проникновения влаги и агрессивных веществ. В Китае внедрены системы модификации бетонов для плотин и гидроузлов, работающих в условиях высокогорья, где сочетаются низкие температуры и повышенное ультрафиолетовое излучение.

Цель данной работы – систематизировать и проанализировать современные методы повышения водонепроницаемости и морозостойкости гидротехнических бетонов, рассмотреть эффективность различных добавок и модификаторов на примере международного опыта, а также определить возможности адаптации этих технологий для климатических и ресурсных условий Казахстана.

Методология

В ряде проектов компании Hydro-Québec, а также на гидроузлах, расположенных в провинции Британская Колумбия, внедрены составы гидротехнических бетонов, ориентированные на обеспечение повышенной плотности структуры и долговечности в условиях многократных циклов замораживания–оттаивания. Основой данных технологий является снижение водоцементного отношения до уровня 0,35–0,40, что существенно уменьшает капиллярную проницаемость и ограничивает проникновение влаги в поровую систему цементного камня.

В качестве минеральных компонентов широко применяются пуццолановые добавки в оптимизированных дозировках: зола-уноса в количестве 15–20 % от массы вяжущего и микрокремнезем в объёме 5–8 %. Их использование способствует заполнению микропор, интенсификации вторичной гидратации и формированию дополнительного гидросиликата кальция (C–S–H), что в совокупности улучшает как водонепроницаемость, так и морозостойкость.

Дополнительно в состав включается до 40 % доменного гранулированного шлака (GGBS), обеспечивающего медленный, но равномерный набор прочности и значительное уплотнение структуры на поздних сроках твердения. Применение GGBS также повышает стойкость бетона к сульфатной коррозии, что является важным фактором для гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в условиях воздействия минерализованных и агрессивных водных сред [1].

Для эксплуатации в условиях частых циклов замораживания–оттаивания (F/T) канадские нормативные подходы предусматривают формирование в структуре затвердевшего бетона оптимальной системы замкнутых воздушных пор. Целевое содержание вовлечённого воздуха устанавливается в диапазоне 5–7 %, при этом контролируется параметр *spacing factor* (среднее расстояние между порами), который должен быть не более 200 мкм. Подобная конфигурация воздушной системы обеспечивает наличие достаточного объёма резервных полостей для компенсации расширения воды при замерзании, минимизируя внутренние напряжения и риск микротрещинообразования.

Для достижения требуемых характеристик используют воздухововлекающие добавки на основе смол древесных кислот, отличающиеся стабильностью формирования пор при различных температурах замеса и твердения. Применение таких добавок сопровождается введением совместимых суперпластификаторов, которые не нарушают устойчивость воздушной структуры и позволяют сохранять высокую удобоукладываемость смеси при пониженном водоцементном отношении.

Контроль параметров воздушной системы осуществляется как на стадии свежей смеси (с использованием полевых методов, например, давления по ASTM C231), так и в затвердевшем бетоне — методом линейного сечения и подсчёта пор по стандарту ASTM C457. Такой двухэтапный мониторинг позволяет своевременно корректировать технологические параметры и обеспечивать стабильное качество бетона при серийном производстве [2].

Дополнительным направлением повышения долговечности гидротехнических сооружений в Канаде, особенно на удалённых объектах с ограниченным доступом для проведения ремонтных работ, является применение интегральной кристаллической гидроизоляции (торговые марки Хурех, Kryton и др.). Данные материалы вводятся в состав бетонной смеси в виде сухих порошковых добавок либо применяются в качестве поверхностных пропиток на ранних стадиях твердения.

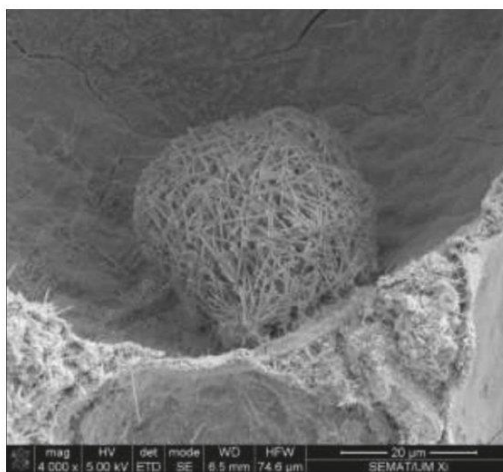


Рисунок 1 – Микроструктура бетонной матрицы с кристаллической гидроизоляцией (Хурех), 28 сут, $\times 5000$ SEM-изображение, демонстрирующее заполнение пор нерастворимыми кристаллами, препятствующими проникновению воды и агрессивных ионов

Механизм их действия основан на росте нерастворимых кристаллических соединений в капиллярно-поровой структуре цементного камня. Эти кристаллы формируются в результате взаимодействия активных компонентов добавки с продуктами гидратации цемента и ионами, присутствующими в поровой жидкости. Заполняя микропоры и капилляры, они создают плотный барьер, препятствующий миграции воды и растворённых солей.

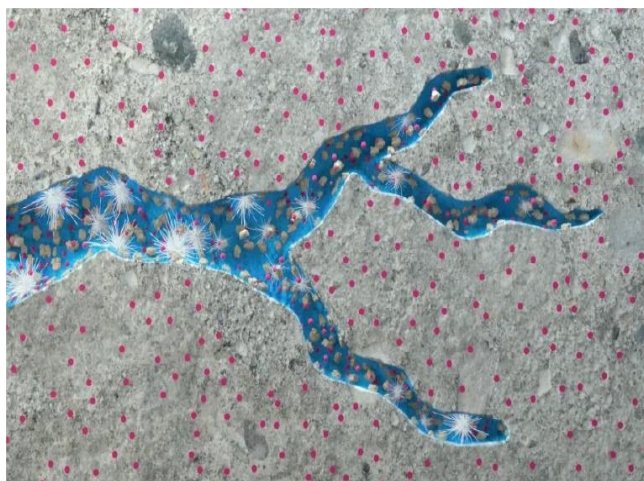


Рисунок 2 – Схема механизма действия интегральной кристаллической гидроизоляции. Показано проникновение активных химических соединений в поры бетона и образование кристаллической структуры в результате взаимодействия с гидратированными продуктами цемента.

Ключевым преимуществом такой технологии является самозалечивание — при повторном контакте с влагой кристаллизационный процесс возобновляется, что позволяет блокировать микротрещины шириной до 0,4 мм и тем самым восстанавливать водонепроницаемость материала без внешнего вмешательства. Практика применения показала, что подобная система эффективно снижает коэффициент водопоглощения и коэффициент фильтрации, а также увеличивает срок службы бетона в условиях переменного увлажнения и действия напорной воды [3].

В условиях сурового климата северных районов провинции Квебек, где гидротехнические сооружения подвержены интенсивным циклам заморозания–оттаивания, обледенению и воздействию ледохода, особое внимание уделяется защите поверхностей бетона от прямого контакта с влагой и резких температурных колебаний.

На ряде плотин и водосбросных сооружений были испытаны и внедрены следующие решения:

- Мембранные покрытия на основе полиуретана или поливинилхлорида (ПВХ), образующие сплошной водонепроницаемый барьер и предотвращающие проникновение влаги в поверхностные слои бетона.

- Напыляемые эластомерные слои, которые обеспечивают дополнительную гибкость защитного покрытия, снижают температурные градиенты и, как следствие, уменьшают риск термического растрескивания.

- Гранулированные изоляционные материалы (минеральные или полимерные), размещаемые в зонах брызгового воздействия, что позволяет снизить интенсивность циклического обводнения и обмерзания бетонных элементов.

Испытания показали, что комплексное применение таких покрытий и изоляционных систем позволяет увеличить срок службы конструкций на 20–30 %, снижая темпы деградации бетона в зонах переменного уровня воды и ледового воздействия [4].

Результаты

Результаты эксплуатационных наблюдений и лабораторных испытаний, проведённых на ряде гидротехнических объектов Канады, свидетельствуют о значительном улучшении долговечных характеристик бетона при комплексном применении пуццолановых добавок и интегральной кристаллической гидроизоляции. В частности, зафиксированы следующие показатели:

– Рост марки по водонепроницаемости с W8 до W16, что обусловлено совместным эффектом уплотнения цементного камня пуццоланами и закупорки капиллярных пор кристаллообразующими компонентами.

– Повышение морозостойкости с F300 до F600 при оптимизации системы воздушных пор, что позволяет значительно увеличить ресурс бетона в условиях частых циклов заморозания-оттаивания.

– Снижение проникновения хлоридов на 50-70 % по результатам испытаний в соответствии с методикой RCPT (ASTM C1202), что является ключевым фактором в предотвращении коррозии арматуры в зонах переменного уровня воды.

Таким образом, канадская практика демонстрирует, что интеграция минеральных добавок и современных систем глубокой гидроизоляции позволяет существенно повысить водонепроницаемость, морозостойкость и стойкость к хлоридной агрессии в условиях сурового климата [4].

В Японии активно развиваются технологии Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRC), которые сочетают в себе высокую прочность, низкую пористость и способность противостоять трещинообразованию. Эти материалы характеризуются развитием микроструктуры, уплотнённой за счёт образования C-S-H и волокон, создающих воздействие «strain-hardening» при растяжении. В частности, исследования UHPFRC, имеющих плотную матрицу, подтверждают его низкую проницаемость и высокую стойкость в сложных условиях эксплуатации – в том числе под воздействием влаги и трещин. Применение таких композитов предлагает новый уровень защиты гидротехнических элементов [5].

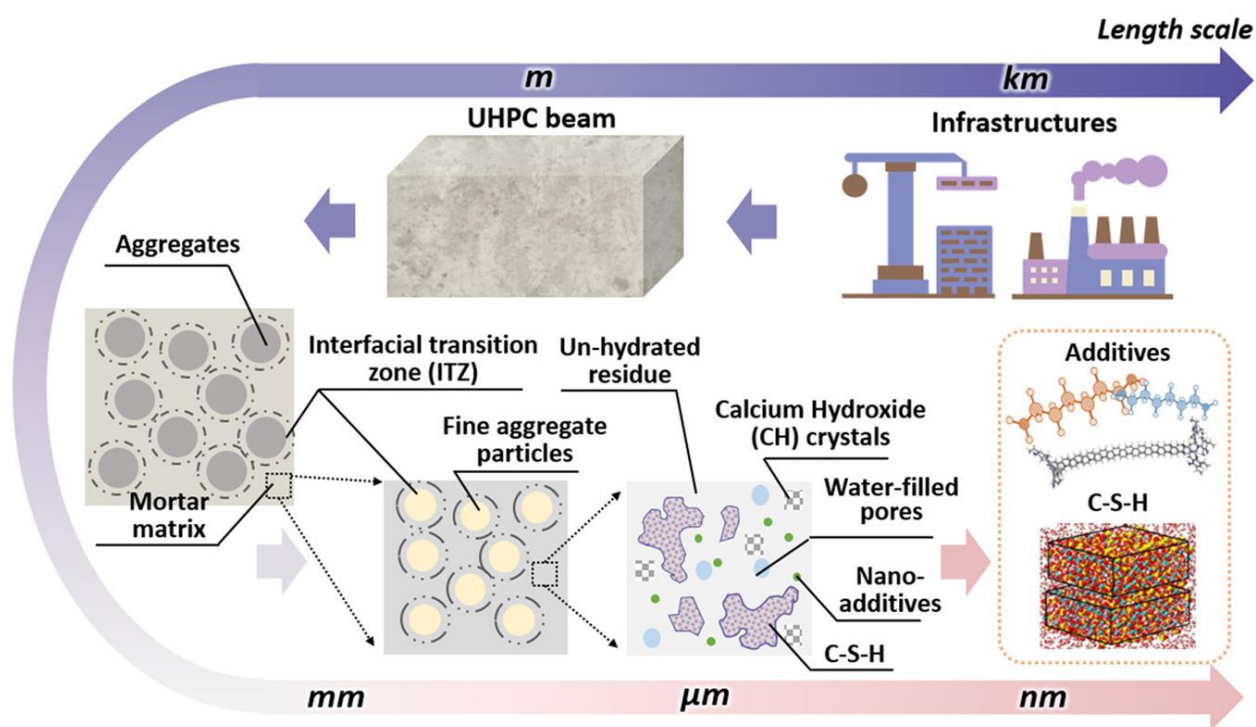


Рисунок 3 – Мультимасштабная модель структуры сверхвысокопрочного бетона (УНПС) поясняет взаимодействие компонентов на макро-, микро- и наноуровнях, включая распределение стальных волокон, ультрамелких частиц и продукты гидратации

Исследования, проведённые в рамках Японского общества по бетону, фокусируются на поведении бетонных конструкций под действием циклов замораживания-оттаивания. В частности, в моделировании учитываются "ice-strengthening" эффекты – когда замороженная вода в порах может кратковременно повышать прочность и жёсткость конструкции при статических и усталостных нагрузках. Эти данные полезны для

понимания долговечности бетонных сооружений в холодных гидродинамических условиях [6].

Японские исследования показывают, что усадкоуменьшающие добавки могут негативно влиять на морозостойкость бетона. Их использование может препятствовать полному гидратационному процессу и ухудшать распределение воздуха в системе пор. Это приводит к более грубой поровой структуре и увеличению восприимчивости к мельчайшим трещинам при замораживании. Таким образом, выбор добавок должен контролироваться с учётом их влияния не только на усадочные процессы, но и на долговечность при F/T-циклах [7].

Таблица 1 – Сравнительные характеристики технологий повышения долговечности бетона

Страна	Основные технологии и подходы	Эффект на характеристики бетона	Особенности применения
Канада	- Воздухововлекающие добавки на основе смол древесных кислот, контроль воздуха (ASTM C457). - Интегральная кристаллическая гидроизоляция (Хурех, Kryton). - Мембранные и напыляемые покрытия, гранулированные изоляционные слои. - Совмещение пуццолановых добавок и кристаллической гидроизоляции.	- Увеличение W_c с W_8 до W_{16} . - Повышение морозостойкости с F_{300} до F_{600} . - Снижение проникновения хлоридов на 50–70 % (RCPT).	- Широко используется в северных районах с частыми F/T-циклами. - Применяется на объектах с ограниченным доступом к ремонту. - Акцент на комплексной защите от влаги и солей.
Япония	- Использование UHPFRC (ультравысокопрочный волокнистый бетон). - Мультимасштабное моделирование F/T-поведения бетона («ice-strengthening») - Комплексная оценка добавок по усадке и морозостойкости.	- Существенное снижение водопоглощения. - Минимизация образования трещин. - Повышение долговечности при переменных температурах.	- Приоритет долговечности над стоимостью. - Используется для особо ответственных гидротехнических сооружений. - Акцент на научно обоснованном подборе добавок.

Выводы

Проведённый обзор показал, что повышение водонепроницаемости и морозостойкости гидротехнических бетонов является комплексной задачей, требующей сочетания технологических, материаловедческих и эксплуатационных решений. Опыт Норвегии демонстрирует эффективность комплексных минеральных вяжущих и оптимизированных воздухововлекающих систем для работы в условиях интенсивного воздействия морской воды и чередующихся циклов замораживания-оттаивания. Канадские подходы акцентируют внимание на снижении водоцементного отношения, широком применении пуццолановых и шлаковых добавок, интегральной кристаллической гидроизоляции, а также на систематическом контроле воздушной пористости и внедрении защитных покрытий для критических зон конструкций.

Японская практика ориентирована на использование ультравысокопрочных волокнистых композитов (UHPFRC), мультимасштабного моделирования процессов

деградации и продуманного подбора модификаторов с учётом их влияния на морозостойкость и усадочные деформации. Такой интегрированный подход обеспечивает не только высокий уровень начальной прочности и плотности структуры, но и долговременную стабильность эксплуатационных свойств бетона.

Анализ показал, что в странах с различными климатическими и эксплуатационными условиями *convergent*-стратегией является снижение капиллярной проницаемости, оптимизация структуры пор и формирование механизмов самозалечивания микротрещин. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка композиционных систем, объединяющих наномодификаторы, кристаллические гидроизоляционные компоненты и адаптивные полимерные покрытия, а также внедрение цифровых инструментов для прогнозирования ресурса гидротехнических сооружений на стадии проектирования.

Список литературы

1 Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K. "Field and Laboratory Investigations of High-Volume Fly Ash Concrete for Highway and Hydraulic Structures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2008.

2 Hooton, R.D. et al., "Performance of air-entrained concretes in Canadian freeze-thaw environments", *ACI Materials Journal*, 2015.

3 Pour-Ghaz, M., Isgor, O.B., "Evaluation of crystalline waterproofing admixtures in concrete structures", *Cement and Concrete Composites*, 2014.

4 Ballivy, G., "Thermal insulation of hydraulic concrete dams: Modelling and field application", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1995.

5 Japan Concrete Institute. Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRC) – Properties and Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 1. Доступно по ссылке: https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jact/4/1/_contents/-char/en

6 Japan Society of Civil Engineers. Ice-strengthening effect on fatigue performance of concrete under freeze–thaw cycles. *Concrete Committee Newsletter*, No. 63. Доступно по ссылке: https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter63/Newsletter63_files/5.html

7 Japanese Society of Cement. Effect of shrinkage-reducing admixtures on frost resistance and pore structure of concrete. *Cement Science and Concrete Technology*, Vol. 63, No. 1. Доступно по ссылке: https://www.jstage.jst.go.jp/browse/cement/63/1/_contents/-char/en

Сведения об авторах (на трех языках):

Жылкышбаева Назым Болатбековна – жетекші инженер, Астана қ. сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Жылкышбаева Назым Болатбековна – ведущий инженер, Испытательная лаборатория г. Астаны, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Zhylkyshbayeva Nazym – Leading Engineer, Testing Laboratory of Astana, Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Смагулова Мария Кусаиновна – кіші ғылыми қызметкер, Ғылымды дамыту департаменті, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, m.smagulova@qazjolgzi.kz

Смагулова Мария Кусаиновна – младший научный сотрудник, Департамент развития науки, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, m.smagulova@qazjolgzi.kz

Smagulova Mariya – Junior Researcher, Department of Science Development, Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan, m.smagulova@qazjolgzi.kz

Женисов Темирлан Сериктаевич – инженер, Астана қ. сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, t.zhenissov@qazjolgzi.kz

Женисов Темирлан Сериктаевич – инженер, Испытательная лаборатория г. Астаны, АО «Казакстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, t.zhenissov@qazjolgzi.kz

Zhenissov Temirlan – Engineer, Testing Laboratory of Astana, Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan, t.zhenissov@qazjolgzi.kz

Пиршаев Досбол Калназарович – жетекші инженер, Астана қ. сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, d.pirshayev@qazjolgzi.kz

Пиршаев Досбол Калназарович – ведущий инженер, Испытательная лаборатория г. Астаны, АО «Казакстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, d.pirshayev@qazjolgzi.kz

Pirshayev Dosbol – Leading Engineer, Testing Laboratory of Astana, Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan, d.pirshayev@qazjolgzi.kz

Алданазаров Мухтар Нургисаевич – инженер, Астана қ. сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, m.aldanazarov@qazjolgzi.kz

Алданазаров Мухтар Нургисаевич – инженер, Испытательная лаборатория г. Астаны, АО «Казакстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, m.aldanazarov@qazjolgzi.kz

Aldanazarov Mukhtar – Engineer, Testing Laboratory of Astana, Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan, m.aldanazarov@qazjolgzi.kz

Вклад авторов:

Жылкышбаева Назым Болатбековна – концепция исследования, методология, организация экспериментальных работ.

Смагулова Мария Кусаиновна – анализ данных, подготовка текста, научное редактирование.

Женисов Темирлан Сериктаевич – проведение лабораторных испытаний, сбор данных.

Пиршаев Досбол Калназарович – контроль качества экспериментов, интерпретация результатов.

Алданазаров Мухтар Нургисаевич – участие в испытаниях, обработка результатов.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта (ИИ): При написании статьи ИИ не был использован.

ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ БЕТОНДАРДЫҢ СУ ӨТКІЗБЕЙТІНДІГІ МЕН АЯЗҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСТЕРІ

Жылкышбаева Н.Б.¹, Смагулова М.К.^{1*}, Женисов Т.С.¹, Пиршаев Д.К.¹, Алданазаров М.Н.¹

¹«Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан

*Корреспондент автор: smagulovamariya98@gmail.com

Аңдатпа. Мақалада гидротехникалық бетондардың су өткізбейтіндігін және аязға төзімділігін арттырудың заманауи әдістері қарастырылған. Канада, Жапония және

Норвегияның қатал климаттық жағдайларында қолданылатын шетелдік технологиялар, соның ішінде пуццоландық және шлақтық қоспаларды пайдалану, интегралды кристалдық гидрооқшаулау, ультражоғары берікті талшықты композиттер (UHPFRC) және оңтайландырылған ауа кеуектері жүйелері талданған. Қоспалардың әсер ету механизмдері, олардың бетонның микроқұрылымына, ұзақ мерзімділігіне және агрессивті әсерлерге төзімділігіне, соның ішінде мұздату–еріту циклдері мен тұздардың енуіне ықпалы қарастырылады. Қазақстан жағдайында құрылымдардың қызмет ету мерзімін болжауға арналған наномодификаторлары бар композиттік жүйелерді және цифрлық құралдарды енгізу перспективасымен қатар, технологиялық, материалтанулық және пайдалану шешімдерін біріктіретін кешенді тәсілдің қажеттілігі туралы қорытынды жасалған.

Түйінді сөздер: гидротехникалық бетон, су өткізбейтіндік, аязға төзімділік, пуццоландық қоспалар, кристалдық гидрооқшаулау.

METHODS FOR IMPROVING WATER RESISTANCE AND FROST RESISTANCE OF HYDRAULIC CONCRETE

Zhylykshbayeva N.¹, Smagulova M.^{1*}, Zhenissov T.¹, Pirshayev D.¹, Aldanazarov M.¹

¹Kazakhstan Highway Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan

*Corresponding author: smagulovamariya98@gmail.com

Abstract. The article discusses modern methods for improving the water resistance and frost resistance of hydraulic concrete. Foreign technologies used in harsh climatic conditions of Canada, Japan, and Norway are analyzed, including the use of pozzolanic and slag additives, integral crystalline waterproofing, ultra-high-performance fiber-reinforced composites (UHPFRC), and optimized air-void systems. The mechanisms of action of additives, their influence on the microstructure of concrete, durability, and resistance to aggressive воздействия, including freeze–thaw cycles and salt penetration, are discussed. The study concludes that a comprehensive approach combining technological, material science, and operational solutions is required, as well as the перспективы внедрения composite systems with nanomodifiers and digital tools for predicting the service life of structures under the conditions of Kazakhstan.

Keywords: hydraulic concrete, water resistance, frost resistance, pozzolanic additives, crystalline waterproofing.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).