



ВЫСОКОПРОЧНЫЙ И МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Абдрасилов Д. Л.¹, Дюсембинов Д.С.^{1*}

¹НАО «Евразийский университет имени Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

*Корреспондент автор: dusembinov@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор применения высокопрочного и модифицированного бетона с использованием промышленных и энергетических отходов в гидротехнических сооружениях. Рассмотрены современные подходы к повышению долговечности плотин, шлюзов, причальных стенок и портовых конструкций в условиях агрессивного воздействия морской воды, абразивного износа, сульфатной коррозии и циклов замораживания–оттаивания. Проанализированы международные проекты (Port of Rotterdam, Maasvlakte 2, Tuas Mega Port, Панамский канал, Kinzua Dam), показано, что применение добавок, таких как гранулированный доменный шлак, микрокремнезём и зола-унос, позволяет существенно увеличить эксплуатационный ресурс конструкций, снизить потери прочности и уменьшить углеродный след строительства. Сделан вывод о стратегической важности интеграции техногенных минеральных добавок в технологии высокопрочного гидробетона для повышения надежности и устойчивости гидротехнических объектов.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, высокопрочный бетон, модифицированный бетон, промышленные отходы, гранулированный доменный шлак (GGBS), микрокремнезём (SF), долговечность, сульфатная коррозия, абразивно-эрозионная стойкость, морозостойкость.

Введение

Долговечность гидротехнических сооружений - ключевой фактор их безопасности, экономической эффективности и экологической устойчивости. Плотины, шлюзы, причальные стенки и другие объекты, работающие в условиях переменного уровня воды, интенсивного течения, ледовых и абразивных воздействий, подвергаются сложному комплексу деградационных процессов: сульфатной коррозии, циклам замораживания–оттаивания, абразивно-эрозионному износу, кавитационным повреждениям. Повышение устойчивости конструкционного бетона к этим воздействиям - одна из приоритетных задач современной гидротехнической инженерии.



Рисунок 1 - Общий вид плотины Three Gorges Dam, иллюстрирующий крупный масштаб сооружения и применение бетонных масс высокого качества (источник: Wikimedia Commons)

За последние десятилетия в мировой практике всё более широкое распространение получает применение промышленных и энергетических техногенных отходов в качестве минеральных добавок и модифицирующих компонентов в высокопрочном бетоне. К таким материалам относятся зола-унос, микрокремнезём, гранулированный доменный шлак, метакраолин и комплексные системы на их основе. Их использование позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики бетона, но и существенно снизить углеродный след строительства за счёт уменьшения доли портландцемента, одновременно вовлекая отходы в хозяйственный оборот.

Опыт зарубежных проектов показывает, что правильно подобранные составы высокопрочного и модифицированного бетона способны обеспечивать десятилетия стабильной работы конструкций без существенных признаков деградации даже в экстремальных средах. Крупные гидроузлы и портовые сооружения в США, Канаде, Норвегии, Китае и ряде других стран демонстрируют успешные примеры применения таких материалов, что подтверждается результатами длительных мониторинговых исследований.

Настоящий обзор систематизирует опыт использования промышленных отходов в составе высокопрочного гидротехнического бетона, с акцентом на устойчивость к сульфатной коррозии, морозостойкость и абразивно-эрозионную стойкость. Особое внимание уделено анализу реальных международных проектов (плотин, ГЭС, портов, шлюзов), описанию применённых технологических решений, а также оценке фактического ресурса и эксплуатационного состояния конструкций.

Методология

Для анализа использовались данные о гидротехнических объектах (плотины, шлюзы, портовые сооружения) и методики:

- состав бетона с различными минеральными добавками (зола-унос, микрокремнезём, гранулированный доменный шлак, метакраолин);

- параметры водоцементного отношения, пористости и плотности;
- полевые обследования, лабораторные испытания (ASTM C1202, ASTM C1138, RCPT), долговечностное моделирование;
- анализ микроструктуры бетона методом сканирующей электронной микроскопии (SEM);
- оценка ресурса конструкций и мониторинг состояния гидротехнических объектов.

Таблица 1 - Примеры применения высокопрочного и модифицированного бетона в гидротехнических сооружениях и расчетный срок службы

Объект/ страна	Основное воздействие	Решение (состав/ материалы)	Ключевой критерий / тест	Ресурс (заданный или фактический)
Портовые сооружения (NL, Port of Rotterdam)	Морская вода, хлориды, абразив от волн	СЕМ III/A-B (GGBS 36–70 %), низкий w/b, низкая проницаемость	Расчёт по миграции хлоридов (STADIUM®), полевые обследования	50-100+ лет (обследовано 18-41 год, деградация минимальна)
Maasvlakte 2 (Нидерланды)	Морская вода, волновое воздействие	НРС с СЕМ III, массивные блоки, конструктивная защита	Конструктивный + материал, оценка по модели срока службы	Проект на ≥ 100 лет
Tuas Mega Port (Сингапур)	Морская вода, хлориды, тропический климат	OPC + 50-70% GGBS, низкий w/b	Проектные расчёты по долговечности, испытания RCP	≥ 100 лет (по расчётам)
Панамский канал – Третий комплект шлюзов	Морская вода, хлориды	OPC + FA/GGBS, w/cm ≤ 0.40 , RCP \leq 1000 Кл	ASTM C1202, расчёт срока службы	100 лет (требование ACP)
Kinzua Dam (США)	Абразивная эрозия, наносы	НРС с 7-10 % SF, ремонтные составы	ASTM C1138 (снижение износа)	Увеличение межремонтного периода в 2-3 раза

Результаты и обсуждение

Мировая практика показывает, что применение высокопрочных и модифицированных бетонов с использованием промышленных техногенных отходов в гидротехнических сооружениях позволяет значительно повысить устойчивость конструкций к агрессивным воздействиям, продлить срок службы и снизить эксплуатационные затраты. Ниже приведены наиболее показательные международные примеры.

В гидротехнических сооружениях порта Роттердам (причалы, волноломы, набережные), эксплуатируемых в условиях интенсивного воздействия морской воды, судового трафика и абразивных наносов, был применён портландшлаковый цемент СЕМ III/A-B с содержанием гранулированного доменного шлака 36-70 %. Такая вяжущая система в сочетании с низким водоцементным отношением (0,40-0,45) и оптимизированным составом смеси позволила обеспечить крайне низкую проницаемость бетона и высокую

устойчивость к хлоридной коррозии, сульфатной агрессии и абразивному износу. Полевые обследования конструкций, находящихся в эксплуатации 18-41 год, показали минимальные признаки деградации: отсутствие существенных трещин, минимальная потеря прочности и отсутствие коррозии арматуры. По результатам долговечностного моделирования подтверждён расчётный срок службы сооружений не менее 50–100 лет без капитального ремонт[1].

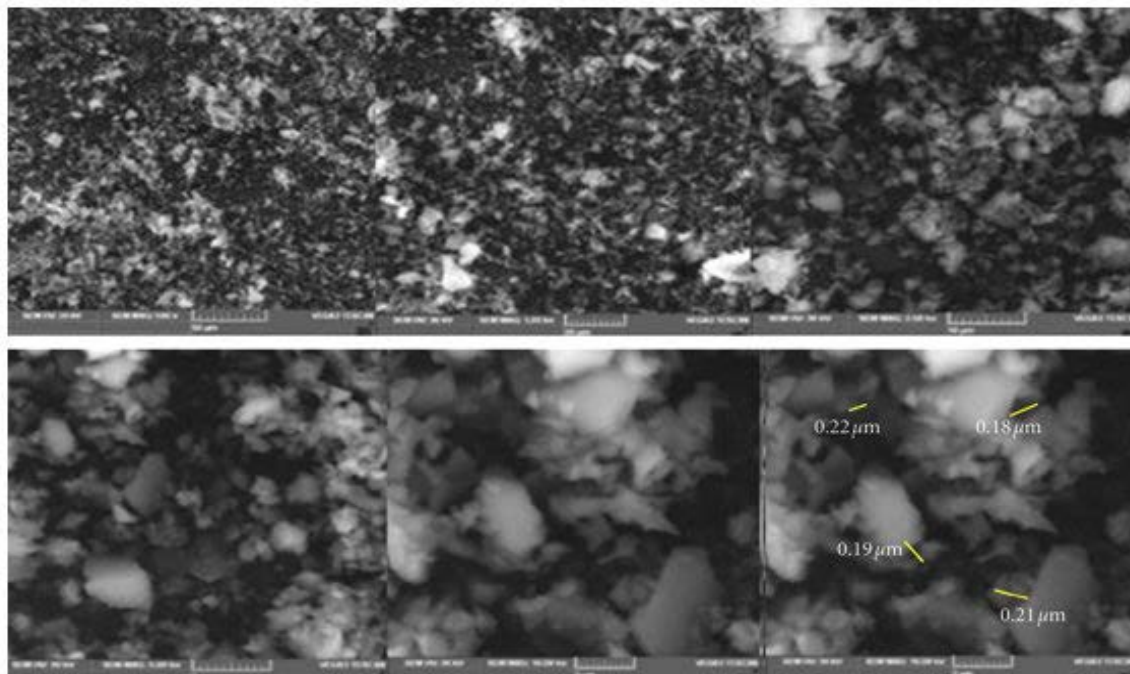


Рисунок 2 - Микроструктура бетона с добавкой микрокремнезёма (SF), полученная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM); увеличенная плотность матрицы и тонкопористая структура подчёркивают потенциал для повышения долговечности (по данным исследования)

При расширении порта Роттердам (Maasvlakte 2, 2008-2013) были построены волноломы, причальные стенки и другие гидротехнические элементы с использованием высокопрочных бетонных конструкций на базе шлакоцемента СЕМ III, характеризующегося низкой проницаемостью и значительным сокращением тепловыделения при твердении — что критично при масштабных заливках в морской среде. Хотя прямые данные о сроке службы отсутствуют, проект инженерного класса предусматривал ресурс конструкции по долговечности не менее 100 лет. Это стало возможным благодаря применению шлакоцементных смесей, обеспечивающих повышенную устойчивость к хлоридному проникновению, сульфатной агрессии и абразивным нагрузкам в условиях непрерывной эксплуатации крупной портовой инфраструктуры [2].

В рамках проекта Tuas Mega Port (Фаза 1, Сингапур) для создания причальных конструкций применялись крупные жёсткие бетонные каиссоны, изготовленные по технологии СЕМ-based смесей с высоким процентом GGBS и/или CO₂-минерализованного бетона, что обеспечивает повышенную долговечность, устойчивость к морской среде и снижает углеродный след. Для Phase 1 было отлито и установлено 221 каиссон размером примерно 28 м × 28 м × 40 м, весом до 15 000 т каждый, образующих 8,6 км набережного фронта; технология многократно применялась для ускорения и повышения качества работ [3]. Проект рассчитан на эксплуатацию в течение ≥ 100 лет, учитывая автоматизацию, контроль качества бетона и инновационные методы защиты (например, силианирование поверхности) [3].

В проекте расширения Панамского канала (Third Set of Locks), где бетонные конструкции эксплуатируются в агрессивной морской среде и подвергаются нагрузкам от колебаний напряжённости и перепадов температур, применён специализированный Structural Marine Concrete (SMC) и Interior Mass Concrete (IMC). Состав включает портландцемент в сочетании с пуццолановыми добавками (fly ash и/или гранулированный доменный шлак - GGBS), а также строгий контроль параметров: максимальный $w/(\text{cementitious materials}) \leq 0,40$, максимальная проницаемость по RCPT ≤ 1000 Кл, и проектный срок службы - 100 лет. Такие требования позволили обеспечить очень высокую долговечность бетона при масштабных объёмах (около 4,3 млн м³) и избежать термического растрескивания благодаря контролю тепловыделения и грамотной дозировке [4].

В зоне бассейна гашения гидроузла Kinzua Dam (река Allegheny, Пенсильвания) в 1973–1974 гг. был выполнен ремонт абразивно-эрозионно повреждённого бетона применением высокопрочного бетона с микрокремнезёмом (silica fume, SF). В 1983 году был проведён лабораторный отбор смесей с SF и известняковым заполнителем, которые демонстрировали высокую абразивную стойкость при приемлемой стоимости. Были выполнены испытания полноразмерных укладок для подтверждения технологической реализуемости: бетоны обеспечивали прочность ≥ 86 МПа (12500 psi) к 28 сут, а реальный 28-сут прочностной результат превысил 90 МПа (13000 psi) [5]. Контроль после эксплуатации (на протяжении одного года, включая сезон с крупным мусором) показал, что SF-бетон «работает как и ожидается», без существенного износа. Более долгосрочные данные (до 10,5 лет) подтверждают, что износ составляет лишь малую долю по сравнению с ранее применявшимися составами - износ при абразивном воздействии оставался минимальным, а участка гидравлического удара (sluice) - без признаков кавитационного повреждения [6].

Заключение

Анализ зарубежного опыта применения промышленных и энергетических отходов в составе высокопрочного и модифицированного гидротехнического бетона подтверждает высокую эффективность таких решений при эксплуатации в агрессивных средах. Использование золы-уноса, микрокремнезёма, гранулированного доменного шлака и других минеральных добавок обеспечивает значительное повышение устойчивости бетона к сульфатной коррозии, многократным циклам замораживания-оттаивания и абразивно-эрозионному износу.

Рассмотренные примеры международных проектов - от гидроэлектростанций в Канаде до портовых сооружений Норвегии и Китая - демонстрируют, что грамотная модификация состава бетона позволяет достигать эксплуатационного ресурса свыше 50 лет без необходимости капитального ремонта при минимальных потерях прочности и целостности структуры. При этом достигается не только повышение долговечности и надёжности конструкций, но и существенное сокращение углеродного следа строительства за счёт снижения доли клинкерного цемента.

В условиях роста климатических рисков, увеличения интенсивности гидродинамических и абразивных нагрузок, а также глобальной задачи по сокращению выбросов CO₂, интеграция техногенных минеральных добавок в технологии высокопрочного гидробетона представляется стратегически важным направлением развития отрасли. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку комплексных многокомпонентных систем модифицирования, оценку их поведения в условиях комбинированных агрессивных воздействий и создание международных баз данных по долговечности таких бетонов в реальных эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Polder R. B., de Rooij M. R. Durability of marine concrete structures - field investigations and modelling (Structures aged 18-41 years along North Sea coast) // *Heron*. - 2005. - Vol. 50, № 3. - Pp. 145-162. - **журнал на англ.языке**
2. Maasvlakte 2 Rotterdam: nieuw land voor uitbreiding Rotterdamse haven! Boskalis Nederland. 2008-2013. (Описание проекта: объём новых территорий, волноломов, причалов, включая применение бетона и шлаковых конструкций) - **электронный ресурс**
3. Size matters: inside the Tuas Mega Port project, Singapore // *Ship Technology Global*. - May 2021. - Issue 76. (О применении крупных бетонных кассонов, автоматизация, инновации в технологии строительства) [Источник: Ship Technology Global] - **журнал на англ.языке**
4. Panama Canal expansion – the third set of locks project. Panama Canal Authority; Scutti America. 2011-2014. Режим доступа: описание контроля прочности, состава бетонных смесей и расчетного срока службы сооружений - 100 лет // Scutti America. - URL: scuttiamerica.com (дата обращения: 13.08.2025) - **электронный ресурс**
5. Holland T. C., Krysa A., Luther M. D., Liu T. C. Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin // *Proceedings of CANMET/ACI Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, Spain, 1986. Vol. 2. Pp. 841-864. - **материалы конференций на англ.языке**
6. Luther M. D., Halczak W. Long-Term Performance of Silica Fume Concretes in the USA Exposed to Abrasion-Erosion or Cavitation - With 10-Year Results for Kinzua Dam and Los Angeles River // *Proceedings of CANMET/ACI Fifth International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, 1995. Vol. 2. Pp. 863–884. - **материалы конференций на англ.языке**

Сведения об авторах (на трех языках):

Абдрасилов Дулат Лесбекулы - т.ғ. магистрі, аға оқытушы, «Өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиясы» кафедрасы, КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана, Қазақстан, d.abdrasilov@mail.ru

Абдрасилов Дулат Лесбекулы - магистр т.н., старший преподаватель, «Технология промышленного и гражданского строительства», НАО «Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилёва», Астана, Казахстан, d.abdrasilov@mail.ru

Abdrasilov Dulat Lesbekuly - master of Technical Sciences, Senior Lecture, Department of Industrial and Civil Construction Technology, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, d.abdrasilov@mail.ru

Дүйсембінов Думан Серікұлы - к.т.н., «Өнеркәсіптік және тұрғын үй құрылысы технологиясы» кафедрасының уақытша міндетін атқарушы доценті, КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана, Қазақстан, dusembinov@mail.ru

Дюсембинов Думан Серикович – кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры «Технология промышленного и гражданского строительства», НАО «Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилёва», Астана, Казахстан, dusembinov@mail.ru

Dusembinov Duman Serikovich - Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction Technology, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, dusembinov@mail.ru

Вклад авторов:

Дюсембинов Д.С. - разработка концепции исследования, анализ литературы и зарубежного опыта, подготовка методологической части.

Абдрасилов Д.Л. - сбор и систематизация данных по международным проектам, анализ результатов испытаний и долговечности бетона.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта (ИИ): Авторы не использовали ИИ при подготовке статьи.

ЖОҒАРЫ БЕРІКТІК ЖӘНЕ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ БЕТОН ӨНЕРКӘСІП ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ

Абдрасилов Д.Л.¹, Дюсембинов Д.С.^{1*}

¹КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия университеті», Астана, Қазақстан

*Хат алмасушы автор: dusembinov@mail.ru

Аннотация. Мақалада гидротехникалық нысандарда өнеркәсіптік және энергетикалық қалдықтарды қолдану арқылы жоғары беріктік және модификацияланған бетонның қолданылуы қарастырылады. Су деңгейінің ауытқуы, абразиялық тозу, сульфаттық коррозия және мұздан еріту-мұздату циклдары әсер ететін жағдайларда бөгеттердің, шлюздердің, кеме причалдарының және порттық құрылыстардың беріктігін арттырудың заманауи тәсілдері қарастырылған. Халықаралық жобалар (Port of Rotterdam, Maasvlakte 2, Tuas Mega Port, Панамалық канал, Kinzua Dam) талданып, гранулирленген шлак, кремнезем және ұшпа күл сияқты қоспаларды қолдану конструкциялардың қызмет мерзімін едәуір арттыруға, беріктік жоғалуын азайтуға және құрылыс көмірқышқыл газ шығарындыларын төмендетуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Жоғары беріктік гидробетон технологияларына техногендік минералдық қоспаларды енгізудің стратегиялық маңыздылығы анықталған.

Түйінді сөздер: гидротехникалық нысандар, жоғары беріктік бетон, модификацияланған бетон, өнеркәсіптік қалдықтар, гранулирленген домендік шлак (GGBS), кремнезем (SF), беріктілік, сульфаттық коррозия, абразивті-эрозиялық төзімділік, мұзға төзімділік.

HIGH-STRENGTH AND MODIFIED HYDRAULIC CONCRETE BASED ON INDUSTRIAL WASTE

Abdrasilov D. L.¹, Dyusembinov D.S.^{1*}

¹NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan

*Corresponding author: dusembinov@mail.ru

Abstract. This article presents a review of the use of high-strength and modified concrete with industrial and energy waste in hydraulic structures. Modern approaches to increasing the durability of dams, locks, quay walls, and port structures under aggressive effects of seawater, abrasive wear, sulfate corrosion, and freeze–thaw cycles are discussed. International projects (Port of Rotterdam, Maasvlakte 2, Tuas Mega Port, Panama Canal, Kinzua Dam) are analyzed, demonstrating that the use of additives such as granulated blast-furnace slag, silica fume, and fly ash significantly increases the service life of structures, reduces strength loss, and lowers the carbon footprint of construction. The strategic importance of integrating technogenic mineral additives into high-strength hydraulic concrete technology for improving reliability and durability of hydraulic facilities is highlighted.

Keywords: hydraulic structures, high-strength concrete, modified concrete, industrial waste, granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume (SF), durability, sulfate corrosion, abrasion-erosion resistance, frost resistance.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) licence (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).