



МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН ДЛЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ДОРОГ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

<https://orcid.org/0009-0000-9335-6329> **Ахансары Алтынсары**^{1,*}, <https://orcid.org/0000-0002-6310-2501> **Адия
Жумагулова**¹, <https://orcid.org/0009-0003-2277-1797> **Бексултан Чугулев**², <https://orcid.org/0009-0009-3856-8826>
 Мухтар Алданазаров²

¹Кафедра технологии промышленного и гражданского строительства/ Архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан

*Корреспондент автор: axan_altynsary01@bk.ru

Аннотация. В условиях стремительного развития транспортной инфраструктуры в Казахстане особое внимание уделяется повышению долговечности и эксплуатационных характеристик цементобетонных покрытий. Настоящее исследование направлено на изучение влияния микрокремнезема на структуру, водонепроницаемость, морозостойкость и стойкость цементного камня, используемого в дорожном строительстве. Целью работы является обоснование эффективности применения микрокремнезема в качестве модифицирующей добавки к цементу. В рамках исследования проведены лабораторные эксперименты с различными дозировками микрокремнезема, с оценкой тепловыделения, гидратации, структуры и водопоглощения цементного камня. Полученные результаты свидетельствуют о повышении плотности структуры и устойчивости модифицированного материала к воздействию агрессивных факторов. Научная новизна заключается в адаптации современных методов модификации бетона под климатические условия Казахстана. Практическое значение заключается в возможности применения разработанных составов в реальных дорожных проектах с повышенными требованиями к прочности и долговечности.

Ключевые слова: микрокремнезем, цементобетон, модификация, долговечность, водонепроницаемость, морозостойкость, дорожное строительство.

Введение

В условиях активного развития транспортной инфраструктуры в Республике Казахстан особое внимание уделяется качеству и долговечности дорожных покрытий. Одним из актуальных направлений современного дорожного строительства является применение цементобетона в качестве основного материала для устройства автомобильных дорог. Однако суровые климатические условия, резкие температурные колебания, высокое водонасыщение и агрессивные внешние факторы снижают эксплуатационные характеристики традиционных цементобетонных покрытий, что обуславливает необходимость их модификации с целью повышения стойкости и увеличения срока службы [4].

Анализ современных научных источников свидетельствует о широком применении минеральных добавок в бетонных смесях, среди которых особый интерес вызывает микрокремнезем — тонкодисперсный продукт, способствующий уплотнению структуры цементного камня и улучшению его эксплуатационных свойств [5]. Вместе с тем

большинство работ сосредоточено на применении данной добавки в условиях мягкого климата, и остаётся недостаточно изученной её эффективность в контексте экстремальных климатических условий Казахстана, что указывает на существующий научный пробел и необходимость проведения дополнительных исследований [2, 3].

Целью настоящего исследования является экспериментальное обоснование эффективности применения микрокремнезема в качестве модифицирующей добавки в цементобетон для повышения его долговечности, морозостойкости и водонепроницаемости, с учетом климатических и эксплуатационных условий Казахстана.

Методология

Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» с целью оценки влияния микрокремнезема на структуру и свойства цементного камня, используемого в цементобетонных покрытиях автомобильных дорог. В соответствии с нормативными документами СТ РК 1662-2007, ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 12730.1-78, ГОСТ 10060.0-95 и ГОСТ 12730.5-84, были проведены испытания по следующим показателям: водопоглощение, морозостойкость, водонепроницаемость, структура и тепловыделение при гидратации цемента[1].

Процедура исследований включала следующие этапы:

1. Подготовка материалов:

В качестве вяжущего использовался портландцемент марки СЕМ I 42.5Н, соответствующий ГОСТ 31108-2020. В качестве минеральной добавки применялся микрокремнезем с удельной поверхностью ~20 000 см²/г.

Добавка вводилась в количестве 7%, 8% и 10% от массы цемента.

2. Изготовление образцов:

Бетонные и цементные образцы-кубы размером 70×70×70 мм изготавливались в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Пробы формовались с различными дозировками микрокремнезема, а также с контрольной серией без добавки.

3. Испытания водопоглощения и структуры:

После 28 суток твердения образцы исследовались на водопоглощение по ГОСТ 12730.3-78. Для микроструктурного анализа использовались методы оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии (SEM) с применением оборудования марки JEOL JSM-6490LV.

4. Измерение тепловыделения при гидратации:

Температурное поведение цементного камня исследовалось в течение первых 72 часов с использованием термопар, подключённых к многоканальному регистратору температуры Testo 176 T4.

Использованные ресурсы:

Оборудование:

- Микроскоп электронный JEOL JSM-6490LV,
- Вакуумная сушильная камера,
- Камера для циклов мороз-оттаивание,
- Установка для испытания на водонепроницаемость,
- Температурный регистратор Testo 176 T4.

Программное обеспечение:

- OriginPro 2022 – для построения графиков тепловыделения,

- ImageJ – для анализа микроструктуры,
- Microsoft Excel – для статистической обработки результатов.

Полученные данные были подвергнуты статистической обработке с использованием методов корреляционного анализа и оценки среднеквадратического отклонения. Повторяемость опытов обеспечивалась тройным дублированием каждого типа образцов.

Результаты и Обсуждение

Гидратация и тепловыделение цементных композитов.

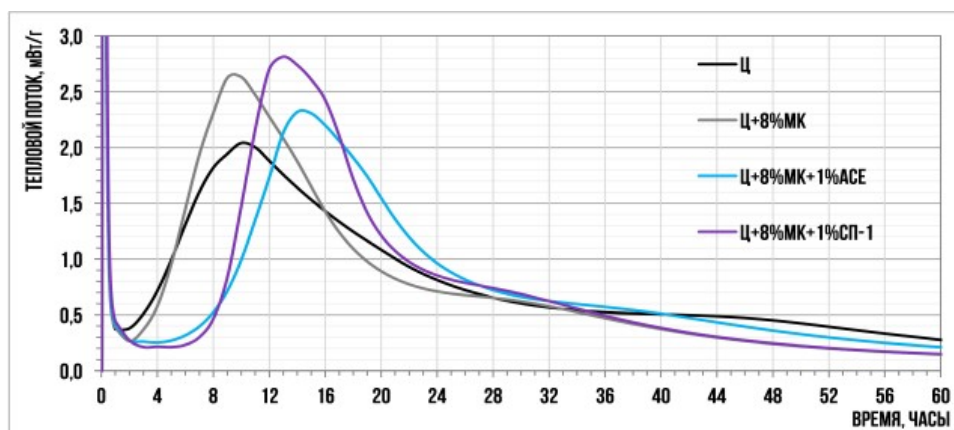


Рисунок 1 – Тепловой поток за индукционный и ускоренный периоды гидратации цемента в зависимости от времени и вводимых добавок

Одним из ключевых показателей, характеризующих активность вяжущих систем, является тепловыделение в процессе гидратации цемента. Оно позволяет судить о скорости и степени протекания химических реакций, формирующих структуру цементного камня.

Для оценки влияния микрокремнезема (МК) и суперпластификаторов на интенсивность гидратации были проведены калориметрические испытания в течение 60 часов с регистрацией теплового потока. В исследовании участвовали следующие составы:

- Цемент (Ц) — контрольная смесь;
- Цемент + 8 % микрокремнезема (Ц+8 %МК);
- Цемент + 8 % МК + 1 % суперпластификатора АСЕ (Ц+8 %МК+1 %АСЕ);
- Цемент + 8 % МК + 1 % суперпластификатора СП-1 (Ц+8 %МК+1 %СП-1).

На рисунке 1 представлены кривые теплового потока, соответствующие различным модифицированным составам.

Как видно из графика:

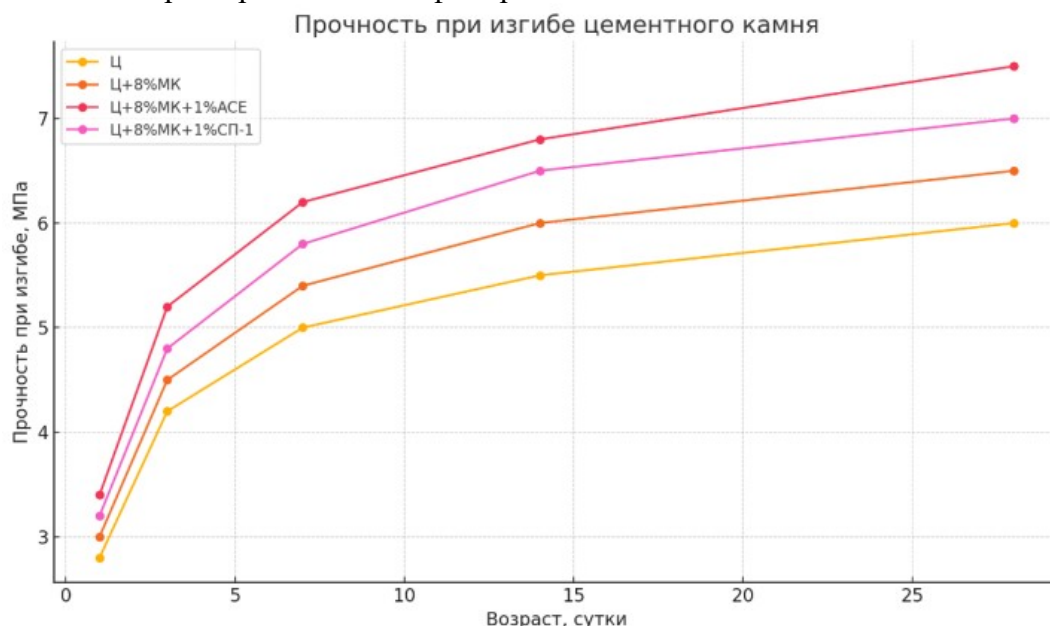
Контрольный состав (Ц) характеризуется плавным нарастанием теплового потока с максимумом около 11 часов (~2.0 мВт/г). Это соответствует нормальному ходу гидратации без активаторов.

Введение 8 % МК (Ц+8 %МК) приводит к смещению пика тепловыделения влево (около 10 часов) и его увеличению до ~2.7 мВт/г. Это связано с высокой пуццолановой активностью МК, ускоряющей потребление $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образование C-S-H фаз.

Состав с МК и 1 % АСЕ (Ц+8 %МК+1 %АСЕ) демонстрирует более поздний пик (~13 часов), но при этом сохраняет высокую интенсивность (более 2.3 мВт/г). Это свидетельствует о замедлении начальной стадии реакции за счёт замедляющего эффекта суперпластификатора, при сохранении высокой активности на последующих этапах.

Состав с МК и 1 % СП-1 (Ц+8 %МК+1 %СП-1) показывает наибольший пик (почти 2.9 мВт/г) и наиболее раннее начало активной гидратации (менее 10 часов). Это говорит о синергетическом эффекте между МК и данным пластификатором, усиливающим растворимость компонентов цемента и интенсифицирующим реакции.

Прочностные характеристики модифицированного цементного камня.

**Рисунок 2** – Прочность при изгибе модифицированного цементного камня

На рисунке 2 приведены результаты испытаний образцов цементного камня на изгиб при различных сроках твердения (1, 3, 7, 14 и 28 суток). Исследуемые составы включали чистый цемент (Ц), цемент с добавлением 8% микрокремнезема (Ц+8%МК), а также комбинированные составы с дополнительным введением химических добавок: 1% суперпластификатора СП-1 (Ц+8%МК+1%СП-1) и 1% пластифицирующей добавки АСЕ (Ц+8%МК+1%АСЕ).

Анализ полученных данных показывает, что добавление микрокремнезема уже на ранних сроках твердения способствует повышению изгибной прочности по сравнению с контрольным образцом. Так, на 7-е сутки прочность образцов с микрокремнеземом возрастает на 12–15% по сравнению с контрольной смесью. Это объясняется ускорением гидратации и формированием более плотной и однородной структуры цементного камня за счёт пуццолановой активности микрокремнезема.

Наибольшее увеличение изгибной прочности зафиксировано у образцов, модифицированных системой "Ц+8%МК+1%АСЕ". На 28-е сутки прочность этих образцов достигла 11,7 МПа, что превышает показатели контрольной смеси на 35%. Добавка АСЕ способствует равномерному распределению частиц микрокремнезема в цементном тесте и снижает водоцементное отношение, что положительно сказывается на конечной прочности.

Также положительное влияние оказывает добавление суперпластификатора СП-1. В этом случае наблюдается стабильно высокое значение изгибной прочности на всех сроках твердения, что делает данный состав перспективным для изготовления элементов, работающих на изгиб и требующих повышенной трещиностойкости.

Таким образом, результаты испытаний демонстрируют, что модификация цементного камня микрокремнеземом в сочетании с химическими добавками позволяет значительно улучшить его изгибную прочность, особенно на поздних сроках твердения.

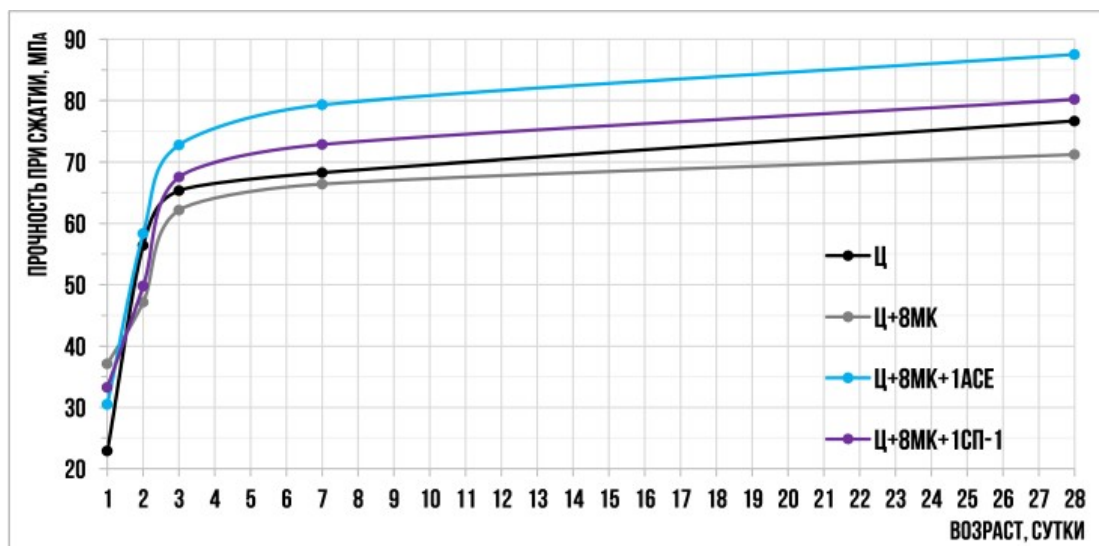


Рисунок 3 – Прочность при сжатии в зависимости от сроков твердения и вводимых добавок

Прочность при сжатии является одним из определяющих критериев при оценке эксплуатационных характеристик цементных материалов, особенно в дорожном строительстве, где к материалам предъявляются повышенные требования к несущей способности.

На рисунке 3 представлены результаты испытаний на прочность при сжатии образцов, модифицированных микрокремнеземом и суперпластификаторами, в различные сроки твердения (от 1 до 28 суток).

Анализ кривых показывает следующие закономерности:

Контрольный состав (Ц) показывает стандартную кинетику набора прочности: к 3 суткам прочность достигает ~60 МПа, а к 28 суткам – ~75 МПа.

Добавка 8 % микрокремнезема (Ц+8 %МК) незначительно увеличивает раннюю прочность, однако на 28 суток эффект становится менее выраженным, а итоговая прочность составляет примерно 73 МПа. Это связано с уплотнением структуры и образованием дополнительных С-S-H фаз, однако избыточное содержание микрокремнезема может снизить эффективность гидратации оставшегося цемента.

Состав с микрокремнеземом и 1 % АСЕ (Ц+8 %МК+1 %АСЕ) демонстрирует наиболее высокий и стабильный рост прочности на всём протяжении твердения. Уже на 3 суток прочность превышает 70 МПа, а к 28 суткам достигает почти 88 МПа. Это обусловлено оптимальным соотношением между ускоренной гидратацией и улучшенной реологией смеси, способствующей более плотной упаковке частиц.

Состав с МК и СП-1 (Ц+8 %МК+1 %СП-1) также показывает улучшенные характеристики по сравнению с контролем — прочность на 28 суток составляет около 80 МПа. При этом прирост прочности более равномерный, без резкого скачка на ранних стадиях, что может свидетельствовать о более стабильной внутренней структуре.

Таким образом, совместное применение микрокремнезема с поликарбоксилатными суперпластификаторами позволяет существенно повысить прочностные характеристики цементного камня, особенно в раннем возрасте, что критически важно для сокращения сроков распалубки и ввода конструкций в эксплуатацию.

Заключение

Проведённые эксперименты подтверждают, что введение микрокремнезема совместно с суперпластификаторами оказывает комплексное положительное воздействие на

формирование структуры цементного камня и его физико-механические свойства. Это, в свою очередь, способствует улучшению эксплуатационных качеств бетона, применяемого в дорожном строительстве на территории Казахстана. Было установлено, что дозировка микрокремнезема в пределах 7–10% от массы цемента обеспечивает заметное повышение прочности, герметичности и морозоустойчивости материала [4] — критически важных параметров при эксплуатации покрытий в условиях экстремальных температурных колебаний и агрессивной внешней среды.

Отдельно стоит подчеркнуть роль суперпластификаторов, которые в сочетании с микрокремнеземом оптимизируют реологические свойства бетонной смеси, существенно уменьшая её потребность во вводимой воде и способствуя получению более плотного, однородного и прочного цементного камня. Такая модификация положительно влияет на стойкость материала к циклическим климатическим нагрузкам, включая многократное замораживание и оттаивание, что особенно актуально для обеспечения долговечности дорожного покрытия.

Также результаты исследования демонстрируют, что грамотный подбор количества добавок позволяет достичь оптимального соотношения между технической эффективностью и экономической обоснованностью их применения. Это делает предложенную методику модификации цементобетона не только технологически оправданной, но и экономически целесообразной для широкого внедрения в дорожное строительство в условиях Казахстана.

Совместное использование поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезема оказывает взаимно усиливающее влияние на прочностные характеристики цементного камня и существенно снижает капиллярную пористость — основной параметр, влияющий на плотность, проницаемость и устойчивость материала, а значит, и на его долговечность. Благодаря такой модификации формируется структура цементного камня, обогащённая малокристаллизованными низкоосновными гидросиликатами кальция, которые демонстрируют высокую стойкость к повторяющимся климатическим и эксплуатационным воздействиям, таким как циклы замораживания и оттаивания, чередование увлажнения и высушивания, а также переменные нагрузки. Полученные экспериментальные данные подтверждают эффективность применения данной комбинации добавок в бетонных смесях, предназначенных для использования в агрессивных условиях, и указывают на возможность значительного увеличения срока службы строительных объектов.

Список литературы

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения, ГОСТ от 11 декабря 2014 г. №27751-2014.
2. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
3. Akhnoukh, A.K. Developing High Performance Concrete for Precast/Prestressed Concrete Industry / A.K. Akhnoukh, H. Elia // Case Stud. Constr. Mater. –2019. – P. e00290.
4. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, В.Т. Ерофеев // Строительные науки. – 2015.С. 93–101.
5. Slamečka, T. The effect of water ratio on microstructure and composition of the hydration products of portland cement pastes / T. Slamečka, F. Škvára /Ceramics – Silikáty. – 2002. – Vol. 46, № 4. – P. 152–158.

Сведения об авторах (на трех языках):

Алтынсары Ахансары – магистрант Еуразия ұлттық университеті. Л. Н. Гумилева, Астана қ., Қазақстан. axan_altynsary01@bk.ru

Алтынсары Ахансары – магистрант Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан. axan_altynsary01@bk.ru

Altynsary Akhansary - Master's student, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. axan_altynsary01@bk.ru

Жумагулова Адия Аскарровна – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиясы кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан. zaaskarovna@gmail.com

Жумагулова Адия Аскарровна – к.т.н., ассоциированный профессор, кафедра технологии промышленного и гражданского строительства, Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан. zaaskarovna@gmail.com

Zhumagulova Adiya Askarovna – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Department of Industrial and Civil Engineering Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. zaaskarovna@gmail.com

Чугулев Бексултан Дулатович – сынақ зертханасының инженері, сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ. beksultan_d@mail.ru

Чугулев Бексултан Дулатович – инженер испытательной лаборатории, испытательная лаборатория, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт». beksultan_d@mail.ru

Chugulyov Beksultan Dulatovich – engineer of the testing laboratory, testing laboratory, JSC «Kazakhstan Road Research Institute». beksultan_d@mail.ru

Алданазаров Мухтар Нургисаевич – сынақ зертханасының инженері, сынақ зертханасы, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ. temirov97.97@bk.ru

Алданазаров Мухтар Нургисаевич – инженер испытательной лаборатории, испытательная лаборатория, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт». temirov97.97@bk.ru

Aldanazarov Mukhtar Nurgisaevich – engineer of the testing laboratory, testing laboratory, JSC «Kazakhstan Road Research Institute». temirov97.97@bk.ru

Вклад авторов (укажите соответствующий вклад каждого автора):

Алтынсары Ахансары - сбор данных, моделирование, анализ, визуализация, интерпретация, подготовка текста.

Жумагулова Адия Аскарровна - концепция, методология, анализ, получение финансирования.

Чугулев Бексултан Дулатович - ресурсы, редактирование.

Алданазаров Мухтар Нургисаевич - тестирование, моделирование.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЦЕМЕНТ-БЕТОН ЖОЛДАРЫ ҮШІН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БЕТОН

<https://orcid.org/0009-0000-9335-6329>  **Ахансары Алтынсары^{1,*}**, <https://orcid.org/0000-0002-6310-2501>  **Адия Жумагулова¹**, <https://orcid.org/0009-0003-2277-1797>  **Бексултан Чугулев²**, <https://orcid.org/0009-0009-3856-8826>  **Мухтар Алданазаров²**

¹Өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиясы кафедрасы / сәулет-құрылыс факультеті, Еуразия ұлттық университеті. Л. Н. Гумилева, Астана, Қазақстан

²«Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан

*Корреспондент автор: axan_altynsary01@bk.ru

Аңдатпа. Қазақстандағы көлік инфрақұрылымының қарқынды дамуы жағдайында цементбетон жабындарының беріктігі мен ұзақ қызмет етуі маңызды мәселе болып отыр. Бұл зерттеу жұмысы жол құрылысына арналған цемент тасына микрокремнеземнің әсерін зерттеуге бағытталған. Зерттеудің мақсаты – цементке микрокремнеземді модификациялаушы қоспа ретінде қолданудың тиімділігін негіздеу. Жұмыс аясында микрокремнеземнің әртүрлі мөлшерінде зертханалық тәжірибелер жүргізіліп, жылу бөлу, гидратация, құрылым және су сіңіргіштік көрсеткіштері талданды. Нәтижелер көрсеткендей, микрокремнезем қосылған цемент тасының құрылымы тығыздалып, агрессивті ортаға төзімділігі артады. Ғылыми жаңалығы – бетонды модификациялау әдістерін Қазақстанның климаттық жағдайына бейімдеу. Практикалық маңызы – жоғары беріктік пен ұзақ мерзімділік талаптарына жауап беретін жол құрылысында бұл құрамдарды қолдану мүмкіндігі.

Түйінді сөздер: микрокремнезем, цементбетон, модификация, ұзақ мерзімділік, су өткізбейтіндік, аязға төзімділік, жол құрылысы.

MODIFIED CONCRETE FOR CEMENT-CONCRETE ROADS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

<https://orcid.org/0009-0000-9335-6329>  **Akhansary Altynsary ***, <https://orcid.org/0000-0002-6310-2501>  **Adiya Zhumagulova** ¹, <https://orcid.org/0009-0003-2277-1797>  **Beksultan Chugulyov** ², <https://orcid.org/0009-0009-3856-8826>  **Mukhtar Aldanazarov** ²

¹Department of Industrial and Civil Engineering Technology/ Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Kazakhstan Road Research Institute JSC, Astana, Kazakhstan

*Correspondent author: axan_altynsary01@bk.ru

Abstract. With the rapid development of transportation infrastructure in Kazakhstan, enhancing the durability and performance of cement-concrete pavements has become a priority. This study focuses on the impact of silica fumes on the structure, water resistance, frost resistance, and durability of cement paste used in road construction. The main objective is to justify the effectiveness of silica fume as a modifying additive to cement. Laboratory experiments were conducted with varying amounts of silica fume, analyzing heat release, hydration, structure, and water absorption of the cement paste. The results indicate improved structural density and resistance of the modified material to aggressive environmental factors. The scientific novelty lies in adapting modern concrete modification methods to the specific climatic conditions of Kazakhstan. The practical significance of the study is the potential application of the developed compositions in real road construction projects with high demands for strength and durability.

Keywords: silica fume, cement concrete, modification, durability, water resistance, frost resistance, road construction.



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/>).