



## СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ДОРОГ

Д.К. Кабдрашит<sup>\*1</sup>, А.А. Утебаев<sup>1</sup>, М.Ж. Ануарбеков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана,  
Республика Казахстан

\*Корреспондент автор: djakharkhan@gmail.com

**Аннотация.** Настоящее исследование представляет обзор современных направлений развития цементобетонных дорожных покрытий, включая прогрессивные материалы, технологические решения, цифровизацию и аспекты устойчивого строительства. Обобщены ключевые мировые практики по повышению долговечности, трещиностойкости и эксплуатационной надёжности цементобетонных покрытий с учётом климатических и эксплуатационных условий.

Проведён сравнительный анализ с текущим состоянием дорожной отрасли в Казахстане, где наметились положительные тенденции в применении модифицирующих добавок, механизированной укладки, использовании промышленных отходов и развитии цифровых методов контроля. Отмечена актуальность локальных научно-практических исследований, направленных на адаптацию передового опыта к континентальному климату и особенностям национальной инфраструктуры.

Особое внимание удалено применению добавок как ключевому элементу в повышении эксплуатационных характеристик бетона и обеспечении устойчивости покрытий. Полученные выводы формируют основу для дальнейшего развития отечественных технологий в области цементобетонных дорог.

**Ключевые слова:** цементобетонные дороги, дорожное строительство, устойчивое развитие, модифицирующие добавки, долговечность покрытий, цифровизация инфраструктуры, эксплуатационные характеристики, дорожные покрытия.

### Введение

Традиционные материалы и технологии, применяемые в дорожной отрасли Казахстана, уже не отвечают современным требованиям: они снижают производительность строительства и обеспечивают ограниченный срок службы дорог. В условиях роста автомобилизации и грузопотока это приводит к ускоренной деградации покрытий и увеличению затрат на ремонт [1].

В этой ситуации особое внимание привлекают технологии, способствующие увеличению ресурса дорожных конструкций. Современная практика показывает, что долговечность цементобетонных покрытий можно существенно повысить за счёт применения модифицированных материалов. Такие решения позволяют эффективно замедлять рост трещин, продлевая срок службы дороги без необходимости капитального ремонта. Это особенно актуально в условиях высоких нагрузок и переменных климатических факторов, что делает применение модифицированных материалов важным направлением развития дорожной отрасли [2].

Однако только материалы не определяют конечное качество покрытия. Качество бетонных дорожных конструкций формируется на всех этапах технологического процесса: от подготовки основания и бетонной смеси до укладки, ухода и соблюдения температурного режима. Повышение трещиностойкости и прочности достигается за счёт применения

современных методов усиления конструкции. Обоснованный выбор материалов и технологий с учётом типовых дефектов способствует снижению деформаций и увеличению срока службы покрытия. В целом, бетонные покрытия обладают рядом преимуществ перед асфальтобетонными и рассматриваются как перспективное направление развития дорожной инфраструктуры [3].

Продолжением этой тенденции являются сборные цементобетонные покрытия, которые эффективно дополняют общую стратегию повышения долговечности. Здесь ключевую роль играет контроль качества на всех этапах устройства — от подготовки основания до герметизации швов. Современные технологические решения, применяемые в сборных системах, направлены на снижение деформаций и повышение надёжности, что соответствует общему вектору развития устойчивой и эффективной дорожной инфраструктуры [4].

Для закрепления этих преимуществ необходим системный подход, включающий обновление нормативной базы, принятие обоснованных проектных решений и многоступенчатый контроль качества на всех стадиях строительства. Учитывая высокую прочность, устойчивость к деформациям и длительный срок службы при надлежащей эксплуатации, цементобетонные покрытия представляют собой рациональное решение, особенно для дорог с интенсивным грузовым движением. Их применение оправдано не только технически, но и экономически, поскольку при сопоставимых затратах они обеспечивают меньшие издержки на содержание и ремонт в течение жизненного цикла. Это направление полностью согласуется с международной практикой и актуальными тенденциями модернизации дорожной отрасли [5].

## **2 Тенденции развития цементобетонных дорог в мире**

### **2.1 США: Программы долговечных дорог (Long-Life Pavement) и применение высокопрочного бетона**

Одним из ключевых источников данных, способствующих развитию долговечных дорожных конструкций в США, является Программа долгосрочного исследования состояния дорожных покрытий (Long-Term Pavement Performance, LTPP). Несмотря на запуск ещё в XX веке, программа продолжает действовать и в XXI веке, обеспечивая непрерывный сбор информации и проведение исследований. Эти данные играют важную роль в совершенствовании подходов к проектированию, строительству и ремонту дорог с акцентом на долговечность. Накопленные сведения позволяют глубже понять факторы, влияющие на износ и разрушение покрытий, и служат основой для создания надёжных цементобетонных дорог, рассчитанных на долгосрочную эксплуатацию [6].

Ещё одной важной вехой в развитии долговечных дорожных конструкций в США стало внедрение концепции «вечного покрытия» (Perpetual Pavement). Эта проектная философия, основанная на сотрудничестве промышленности, научных учреждений и государственных органов, ориентирована на создание асфальтовых покрытий со сроком службы более 50 лет без необходимости капитального ремонта, требующих лишь периодического обновления верхнего слоя.

Показательным примером является проект Калифорнийского департамента транспорта (Caltrans) — реконструкция участка I-5 в районе Сакраменто (2019–2021), где применялись принципы вечного покрытия на магистрали с высокой транспортной нагрузкой. Анализ затрат за жизненный цикл показал экономию около 40 % (без учёта дисконтирования) на 60-летнем горизонте по сравнению с традиционными покрытиями, несмотря на несколько более высокую (на 4 %) начальную стоимость. В рамках проекта было использовано около 350 000 тонн асфальтобетонных смесей, включая резиноасфальт в верхнем слое, что подчёркивает масштаб и практическую эффективность этой технологии [7].

Инициативы на уровне отдельных штатов дополнительно подтверждают общенациональный курс на внедрение долговечных дорожных решений. Департамент транспорта штата Мичиган (MDOT), в соответствии с законодательной инициативой 2015 года, реализовал пилотные проекты в период 2017–2019 гг., построив четыре экспериментальных участка дорог (два асфальтовых и два бетонных) с применением качественных материалов и передовых технологий, рассчитанных на 50-летний срок службы.

Результаты показали значительно более высокий потенциал долговечности по сравнению с традиционными конструкциями, рассчитанными на 20 лет, несмотря на более высокие начальные затраты. Исследования MDOT подчеркнули важность строительных приёмов, таких как одновременное применение двух асфальтоукладчиков для повышения однородности смеси и устойчивости покрытия. Оценка проектов включала детальные лабораторные испытания и расчёты по механистически-эмпирическим моделям с целью прогнозирования срока службы и анализа экономической эффективности для дальнейшего широкого применения [8].

**Таблица 1 – Период ключевых решений.**

Технология / Материал	Период применения	Ключевые преимущества	Область применения
Бетон с заданными эксплуатационными характеристиками	2015–2025	Долговечность, прочность на основе полевых испытаний	Автомагистрали, городские дороги
Резиноасфальт, смеси с вторичными материалами	2015–2025	Экологичность, эффективное использование ресурсов	Городские и сельские дороги, зоны дренажа
Тёплый асфальт	2015–2025	Снижение выбросов, безопасность при укладке	Автомагистрали, городские улицы
Пористый асфальт / бетон	2015–2025	Управление ливневыми водами, устойчивость городской среды	Парковки, дороги с низкой нагрузкой
Цементно-обработанные основания	2015–2025	Прочность, уменьшение толщины конструкции, снижение затрат	Автомагистрали, проблемные грунты
Современный контроль качества	2015–2025	Однородность, оперативный контроль, улучшенные результаты	Все крупные строительные объекты

Методы сохранения дорожных покрытий также значительно эволюционировали благодаря более широкому применению цифровых технологий и систем принятия решений на основе данных [9]. Так, в штате Техас данные, полученные с использованием прибора Texas Stress-Depth Deflectometer (TSDD), были интегрированы в систему управления дорожными покрытиями. Это позволило более эффективно распределять ресурсы на проведение профилактических мероприятий (например, устройство защитных слоёв типа «чип-сил»), что способствует продлению срока службы покрытий за счёт своевременного и обоснованного вмешательства [10].

## **2.2 Канада: Инновационные решения в условиях сурового климата**

Канада сталкивается с особыми вызовами в области проектирования дорожных покрытий из-за своего сурового континентального климата, характеризующегося экстремальными температурами и многократными циклами замерзания и оттаивания. За последние десятилетия, особенно в период с 2015 по 2025 год, канадские агентства и научные учреждения разработали и внедрили инновационные, устойчивые к климату решения, направленные на увеличение срока службы покрытий, снижение затрат на содержание и повышение экологической устойчивости.

### **2.2.1 Стратегии долговечных покрытий и сохранения**

Опыт, накопленный за более чем 60 лет проведения испытаний покрытий в различных климатических зонах Канады, подтвердил важность проектирования конструкций с учётом длительного срока службы в условиях серьёзного климатического воздействия. Результаты показали необходимость сбалансированного выбора свойств битумов, с акцентом на низкое содержание парафинов, а также использование полимерных и волокнистых модификаций для повышения устойчивости к трещинообразованию и колеообразованию при сохранении гибкости и прочности. Например, в провинции Альберта полимермодифицированные и армированные волокнами битумы продемонстрировали высокую эффективность, снижая риск хрупкого разрушения при низких температурах и интенсивном трафике [11].

Для сохранения существующих дорог широко применяются методы профилактического ремонта. В провинциях Онтарио и Новая Шотландия активно используют технологии герметизации трещин, туманные эмульсии, поверхностные обработки (чип-силы), микроповерхности, а также горячую и холодную регенерацию на месте. В Новой Шотландии для повышения производительности применяется внутренняя бригада по устройству поверхностных обработок и мобильный асфальтобетонный завод, что позволило увеличить темпы обновления дорожного покрытия на 50% и ежегодно экономить миллионы долларов за счёт своевременного вмешательства, предотвращающего капитальный ремонт [12].

Канадские дорожные агентства также используют системы управления дорожными покрытиями, основанные на сетевом планировании и объективных показателях состояния, чтобы оптимизировать сроки и затраты на восстановление — это особенно важно в условиях ограниченного финансирования [13].

### **2.2.2 Инновационные материалы для сурового климата**

Учитывая климатические вызовы, в Канаде были разработаны асфальтовые и бетонные материалы, адаптированные к морозостойкости и термическим напряжениям:

Современные модифицированные битумы: Исследования показали, что жёсткие битумы, хотя и эффективно борются с колеообразованием, могут вызывать трещины от холода без соответствующей модификации. В Канаде разработаны устойчивые к фазовым изменениям полимерные и волокнистые модификации, значительно повышающие срок службы дорожных покрытий в холодных регионах.

Долговечные цементобетонные покрытия: Под влиянием европейских и канадских исследований, в стране проектируются бетонные покрытия с расчётным сроком службы более 30 лет при минимальном обслуживании. Внедряются технологии открытого щебеночного слоя (для снижения шума в городах) и геотекстильных прослоек, повышающих надёжность конструкции при неблагоприятных условиях.

Устойчивость и адаптация к изменению климата: в рамках стратегической цели Канады по достижению нулевых выбросов к 2051 году, такие провинции, как Онтарио, интегрируют принципы устойчивости в проектирование дорожных покрытий. Это включает активное использование вторичного асфальта (RAP), сбережение природных ресурсов и внедрение инновационных методов строительства, оцениваемых по системе GreenPave. Эти меры позволяют одновременно снижать выбросы парниковых газов,

экономить материалы и учитывать экономические, экологические и эксплуатационные критерии.

### **2.3 Китай: Масштабное внедрение цементобетона в автомагистральном строительстве**

К концу 2023 года общая протяжённость автомобильных дорог, покрытых обычным цементобетоном в Китае, достигла приблизительно 3 299 915 километров, продемонстрировав устойчивый рост по сравнению с 3 261 947 км в 2022 году и резкое увеличение с менее чем 200 000 км в 2003 году [14]. Это отражает последовательный курс на модернизацию и расширение долговечных цементобетонных покрытий для удовлетворения высоких транспортных потребностей страны.

Этот строительный бум соответствует масштабной урбанизации и инфраструктурному развитию Китая. В начале XXI века на долю Китая приходилось почти половина мирового прироста городской застройки, что сопровождалось быстрым строительством жилья, аэропортов, автомагистралей и других крупных объектов. Цементобетон, как основной строительный материал, сыграл ключевую роль в реализации национальных инфраструктурных стратегий и в становлении современной экономики Китая [15].

С 2015 года в китайской научной и инженерной практике особое внимание уделяется вопросам устойчивости и долговечности: ведётся активная разработка технологий низкоуглеродистого бетона, повышенной прочности и ультравысоких характеристик бетонных смесей для автодорог, а также оптимизируются методы проектирования и строительства. Искусственный интеллект уже применяется для оптимизации состава бетонных смесей и улучшения контроля качества [16]. Кроме того, с учётом того, что Китай производит более половины мирового объёма цемента (свыше 4,1 млрд тонн в год), значительное внимание уделяется вопросам декарбонизации цементной промышленности и снижению выбросов в дорожном строительстве за счёт применения экологичных технологий.

Стандарты расчёта и проектирования цементобетонных дорог также совершенствуются, сочетая национальные строительные нормы КНР с международной практикой. Это позволяет оптимизировать толщину конструкций, долговечность и устойчивость покрытий к интенсивным нагрузкам и разнообразным климатическим условиям.

Итог: период 2015–2025 гг. в Китае характеризуется беспрецедентным ростом в сфере цементобетонного дорожного строительства, который включает:

Масштабное расширение сети автодорог с цементобетонным покрытием (более 3,2 млн км к 2023 году);

Внедрение передовых технологий бетона, ориентированных на качество, долговечность и устойчивость;

Активные исследования и применение низкоуглеродных материалов и экологичных методов производства;

Применение ИИ и цифровых инструментов для подбора состава, контроля качества и управления строительством;

Инфраструктурные программы на уровне государства, обеспечивающие высокий спрос и быстрые темпы строительства цементобетонных дорог.

Эти достижения подтверждают, что цементобетон остаётся ключевым материалом в реализации транспортных мегапроектов Китая и одновременно становится основой для перехода к более экологичным и долговечным решениям.

### **2.4 Германия: Европейские подходы к устойчивому строительству**

Подход Германии к устойчивому строительству и переработке в дорожной инфраструктуре сочетает в себе передовые цифровые технологии, инновационные

материалы и экологически безопасные практики, соответствующие строгой природоохранной политике и амбициозным климатическим целям страны.

#### **2.4.1 Цифровые инновации: Информационное моделирование зданий (BIM)**

Германия систематически внедряет информационное моделирование зданий (BIM) при строительстве федеральных автотрасс в соответствии с Мастер-планом BIM для федеральных дорог [17]. С 2015 года технология проходит пилотные испытания почти во всех федеральных землях с целью повышения прозрачности затрат, сокращения отходов и соблюдения сроков реализации проектов. В рамках текущей стратегии (с 2025 года) планируется активное использование цифровых двойников для оптимизации управления жизненным циклом инфраструктуры — от проектирования и строительства до эксплуатации и техобслуживания, снижая при этом экологическую нагрузку [18].

#### **2.4.2 Инновации в материалах и переработке**

Германия делает акцент на использование вторичных материалов при строительстве и ремонте дорожного покрытия. В сети Автобанов активно применяются переработанный асфальт и резина от изношенных шин, что снижает потребление природных ресурсов и сокращает количество отходов. Также используется экобетон — бетон с пониженным углеродным следом, особенно в строительстве мостов и тоннелей, демонстрируя стремление Германии к снижению углеродоёмкости крупномасштабных проектов [19].

В рамках программы «Дороги XXI века» реализуются исследования и пилотные проекты, направленные на:

- расширенное применение гранулированного асфальта и альтернативных вяжущих;
- достижение 100 % переработки асфальта;
- использование экологических цементов с пониженным воздействием на окружающую среду;
- внедрение жизненного цикла устойчивости (LCA) в процессы планирования и содержания дорог.

#### **2.4.3 Экологические аспекты и охрана дикой природы**

Германия активно интегрирует природоохранные меры в транспортную инфраструктуру: строятся многочисленные экодуки (надземные и подземные переходы для животных), что позволяет сохранить биоразнообразие и снизить количество ДТП с участием диких животных. На автомагистралях устанавливаются шумозащитные экраны, которые защищают не только жилые районы, но и природные экосистемы от акустического загрязнения.

#### **2.4.4 Энергоэффективность и борьба с загрязнением**

Подход к устойчивости включает энергосберегающие и природоохранные меры:

- установка солнечных панелей на шумозащитных барьерах для генерации возобновляемой энергии;
- массовое внедрение энергосберегающего светодиодного освещения на автомагистралях;
- развитие дренажных и водоочистных систем, предотвращающих загрязнение водоёмов;
- сеть станций контроля качества воздуха вдоль дорог позволяет оперативно реагировать на повышение уровня загрязнений.

#### **2.4.5 Устойчивое строительство и содержание дорог**

Крупные проекты, такие как реконструкция и расширение автомагистрали A1 (завершение в 2025 году), служат примером внедрения принципов устойчивости на

практике. В проект входит капитальный ремонт мостов, озеленение, шумозащита и ведётся в несколько этапов для обеспечения бесперебойного движения транспорта.

При этом все инфраструктурные проекты подчиняются жёстким экологическим требованиям — от выдачи разрешений до контроля и мониторинга, что гарантирует соответствие климатической политике страны.

#### **2.4.6 Европейское сотрудничество: проект DURABROADS**

На уровне ЕС Германия участвует в проекте DURABROADS, направленном на разработку долговечных и экологически оптимизированных дорожных покрытий с использованием нанотехнологий и вторичных материалов. Среди результатов:

- Создание модифицированных вяжущих с повышенной стойкостью к старению;
- Использование теплого асфальта (WMA), до 97 % наполнителей которого заменены на переработанный асфальт и металлургические шлаки;
- Разработка руководств по «зелёным» государственным закупкам, стимулирующих применение устойчивых решений.

Эти инновации способствуют адаптации к климатическим изменениям и развитию «зелёной экономики» в транспортной сфере.

#### **2.5 Южная Корея: Высокотехнологичные подходы и интеллектуальное управление дорогами**

Высокотехнологичная и интеллектуальная стратегия управления дорожной инфраструктурой Южной Кореи тесно связана с применением передовых технологий в области цементобетона, что позволяет создавать «умные», долговечные и устойчивые дороги, соответствующие требованиям будущей мобильности [20].

Одним из ключевых примеров является широкое внедрение покрытий нового поколения — Next Generation Concrete Surfaces (NGCS). Эти покрытия сочетают в себе алмазное шлифование и нарезку канавок, обеспечивая более гладкую, бесшумную и безопасную поверхность, особенно в сложных условиях, таких как тоннели и мосты, характерные для гористой местности Южной Кореи [21]. Такие покрытия повышают безопасность и долговечность, создавая идеальную основу для «умных» технологий: они поддерживают высокий коэффициент сцепления и ровность покрытия, способствуют автономному вождению и снижают потребности в ремонте [22].

Программа Smart Expressway Program (2019–2024) предусматривает создание автомагистралей, оснащённых не только возможностью беспроводной зарядки электромобилей и инфраструктурой для автономных транспортных средств, но и умными бетонными покрытиями. Хотя асфальт по-прежнему широко используется, развивающаяся сеть дорог всё чаще включает интеллектуальные бетонные системы с встроенными датчиками и прочными покрытиями, необходимыми для сбора данных, мониторинга состояния дорог и обеспечения связи в реальном времени между транспортом и инфраструктурой.

Кроме того, строительство самих дорог выигрывает от внедрения цифровых технологий: используется ИИ, беспилочная техника, дроны и цифровое картографирование для высокоточного укладки бетона и контроля качества. Это улучшает равномерность покрытий и продлевает их срок службы — особенно важно, поскольку бетонные дороги являются основой многих скоростных магистралей и тоннелей Южной Кореи [23].

Также безопасность и управление обслуживанием повышаются за счёт «умных» бетонных решений — например, встроенных сенсоров, способных отслеживать структурную целостность, температуру и нагрузки от трафика. Такие покрытия поддерживают проактивное техническое обслуживание и интегрируются в более широкую систему связи V2X (Vehicle-to-Everything), создавая единую цифровую экосистему, где прочные, технологичные бетонные покрытия становятся частью инфраструктуры автономного вождения и «подключённого» транспорта.

В кратком изложении, подход Южной Кореи к интеллектуальному управлению дорогами непосредственно связан с цементобетоном через:

- применение покрытий нового поколения для повышения долговечности, снижения шума и обеспечения безопасности;
- внедрение встроенных сенсоров в бетонные покрытия для интеллектуального мониторинга и коммуникаций;
- использование цифровых технологий строительства для оптимизации качества и срока службы бетонных дорог;
- поддержку беспроводной зарядки электромобилей и систем автономного вождения, возможных благодаря прочной и ровной бетонной инфраструктуре [24].

Эти инновации превращают цементобетон не просто в конструкционный материал, а в активный элемент умной, устойчивой и высокотехнологичной транспортной системы Южной Кореи.

## **2.6 Монголия (в контексте проектов Южной Кореи): Локализация технологий и вызовы при внедрении**

В период с 2024 по 2027 год южнокорейские институты во главе с Корейским институтом гражданского строительства и строительных технологий (KICT) реализуют масштабный проект по локализации технологий интеллектуального управления дорогами в Монголии в рамках Меморандума о взаимопонимании (MOU), подписанного с Министерством дорожного и транспортного развития Монголии (MRTD).

Цель проекта — адаптация передовой корейской интегрированной системы управления дорогами K-smart к специфическим условиям Монголии для повышения устойчивости, долговечности дорог и эффективности транспортной инфраструктуры.

### **2.6.1 Локализация технологий в контексте бетонных дорог**

Суровый климат Монголии — резкие перепады температур, циклы замораживания и оттаивания, огромные неосвоенные территории — предъявляет особые требования к технологии строительства бетонных дорог. Это требует адаптации корейских высокотехнологичных решений в области бетонных покрытий к экстремальным погодным условиям при обеспечении экономической и практической реализуемости в условиях слаборазвитой инфраструктуры.

Основные вызовы локализации и внедрения:

Адаптация материалов: разработанные в Корее устойчивые бетонные смеси и покрытия нового поколения (Next Generation Concrete Surfaces, NGCS) нуждаются в доработке для устойчивости к резким перепадам температур и циклам замораживания-оттаивания. Необходима корректировка составов добавок, армирования волокнами и технологии ухода за бетоном для достижения долговечности в условиях континентального климата.

Строительные возможности: строительная отрасль Монголии развивается, но пока не обладает достаточным опытом в применении передовых бетонных технологий, широко используемых в Южной Корее. Передача знаний через обучающие программы, заложенные в проекте, играет ключевую роль в обеспечении качества строительства и внедрении сенсорных технологий для «умного» мониторинга.

Интеграция систем управления: южнокорейские стратегии управления дорожной инфраструктурой основаны на встроенных в бетонные покрытия сенсорах, продвинутой диагностике и ИИ-системах предиктивного обслуживания. Внедрение этих решений в Монголии требует наличия инфраструктуры для сбора данных и цифровой связи, которая пока ограничена, особенно в сельских районах.

Ресурсы и бюджетные ограничения: учитывая огромную территорию страны и ограниченные бюджеты, технологии должны быть экономически эффективными и адаптированы под местные ресурсы. Передача технологий из Кореи делает акцент на

масштабируемых решениях и обучении, позволяющих строить и обслуживать бетонные дороги с высокой эффективностью.

Развитие человеческого капитала: меморандум предусматривает повышение квалификации монгольских специалистов в дорожной отрасли через семинары, обменные программы и демонстрационное оборудование для диагностики дорожных разрушений. Эти меры являются ключевыми для успешной локализации «умных» бетонных технологий и обеспечения их устойчивого развития.

Связь с более широкими инициативами Южной Кореи в области интеллектуальных дорог

Программа Smart Expressway и система K-smart Integrated Road Management, включающая бетонные покрытия с датчиками, контроль качества строительства и ИИ-обслуживание, служат моделью для Монголии. Передача технологий предусматривает адаптацию этих решений к монгольским условиям с учётом цифровых и технологических ограничений.

Благодаря локализации данных технологий Монголия стремится модернизировать свою дорожную сеть, улучшить прочность и эксплуатационные характеристики бетонных покрытий в экстремальных климатических условиях, обеспечивая более безопасную и устойчивую транспортную систему в соответствии с принципами устойчивого развития и интеллектуальной мобильности будущего.

### **3. Ключевые аспекты технологии цементобетонных дорожных покрытий**

#### **3.1. Применяемые материалы и составы цементобетона**

Вяжущее: основным вяжущим веществом является портландцемент, который часто комбинируется с 20–50 % минеральных добавок (SCM) — таких как зола-унос, гранулированный доменный шлак (GGBFS) и микрокремнезём. Эти компоненты способствуют повышению долговечности покрытия и снижению углеродного следа.

Заполнители: используются мелкие и крупные заполнители с контролем по фракции, чистоте и гранулометрии для обеспечения плотности и минимизации водопроницаемости.

Химические добавки:

- воздухововлекающие добавки (AEA): повышают устойчивость к циклам замораживания и оттаивания.

- пластификаторы (WRA): обеспечивают удобоукладываемость при снижении водоцементного отношения.

- добавки для снижения усадки (SRA): снижают напряжения, вызванные усадкой при высыхании.

Волокна: в передовых и северных проектах используются стальные или полимерные волокна для повышения прочности на растяжение и сопротивления образованию трещин.

Низкоуглеродный бетон: активно внедряются технологии с высоким содержанием SCM и промышленных побочных продуктов для снижения выбросов CO<sub>2</sub> при сохранении эксплуатационных характеристик.

**Таблица 2. Региональные подходы к составу бетонной смеси**

<b>Регион</b>	<b>Особенности состава бетонной смеси</b>
США	Высокое содержание золы и шлака, воздухововлечение, строгие требования к заполнителям
Канада	Модификация полимерами и волокнами, устойчивость к замораживанию-оттаиванию, рациональное использование SCM
Китай	Низкоуглеродные и УВП-бетоны, ИИ-оптимизация состава, высокая прочность для тяжёлых нагрузок
Германия	Экологичные вяжущие, вторичные заполнители, устойчивый подход к проектированию

Южная Корея	NGCS-поверхности, бетон с сенсорами, высокая доля шлака для долговечности
Монголия	Адаптация корейских смесей, волокна и добавки для морозостойкости, использование местных ресурсов

### 3.2. Технологии укладки и используемое оборудование

Приготовление смеси: централизованные автоматизированные узлы обеспечивают точность дозировки и однородность.

Укладка: бетоноукладчики с опалубкой-скользящей формой (slipform) обеспечивают непрерывность и высокое качество поверхности. Применяется лазерное или GPS-наведение.

Уплотнение и контроль: встроенные датчики в реальном времени контролируют температуру, осадку конуса, толщину слоя и позволяют оперативно корректировать параметры.

Обработка поверхности: алмазное шлифование, нарезка канавок и текстурирование поверхности повышают гладкость, сцепление и снижают уровень шума.

Передовое оборудование: используются беспилотники, роботизированные машины и ИИ-системы для оценки качества, контроля хода строительства и выявления дефектов.

**Таблица 3. Сравнительная таблица по технологиям**

Регион	Технологические особенности
США	Автоматизированный контроль качества, ускоренное твердение
Канада	Мобильные заводы, сезонная адаптация, технологии сохранения
Китай	Механизированная укладка, цифровое управление, ИИ-дизайн
Германия	BIM, экотехника, минимизация отходов
Южная Корея	Контроль NGCS, сенсоры, автономные системы
Монголия	Передача технологий из Кореи, обучение, адаптивные машины

### 3.3. Методы повышения долговечности и трещиностойкости

Воздухововлечение: Создание мелких воздушных пор предотвращает разрушения от замораживания-оттаивания.

Оптимизация SCM: добавление золы и шлака снижает водопроницаемость и химическую реактивность (например, реакцию щёлочь-кремнезём, сульфатную коррозию).

Армирование волокнами: ограничивает развитие и распространение трещин от нагрузок и воздействия окружающей среды.

Контроль водоцементного отношения: обеспечивает плотную структуру и низкую проницаемость.

Контролируемое твердение: Поддержание влаги и температуры предотвращает ранние трещины и обеспечивает полноценную гидратацию.

Оптимизированные швы: Применение дюбелей, правильный шаг и глубина швов минимизируют деформации.

Управление усадкой: Использование SRA-добавок и корректных графиков ухода за бетоном.

### 3.4. Мониторинг состояния и цифровизация дорог

Системы управления дорожным покрытием (PMS): системы мониторинга (например, LTPP в США, PMS в Корее) фиксируют состояние покрытия, деформации и срок службы.

Встроенные датчики: в бетон встраиваются сенсоры для измерения напряжений, температуры и деформаций, что позволяет переходить к предиктивному обслуживанию.

Цифровые двойники и BIM: моделирование активов и цифровое проектирование повышают управляемость и точность сценарного планирования.

Автоматизированный осмотр: используются машинное зрение, лазерное сканирование и ИИ для точного и оперативного выявления дефектов.

**3.5. Экологичность, углеродный след и устойчивое развитие SCM** и вторичные материалы: массовое использование золы, шлака и других промышленных отходов снижает выбросы CO<sub>2</sub> при производстве цемента.

Циркулярные ресурсы: Применение переработанных заполнителей, фрезерованного асфальта (RAP), экологичных вяжущих.

Энергоэффективность: технологии теплого бетонирования и оптимизация строительных процессов снижают энергозатраты.

Оценка жизненного цикла: Использование LCA и индексов устойчивости (например, GreenPave, аналоги LEED) для принятия решений по закупкам и ремонту.

Интеллектуальные элементы дорог: Интеграция солнечных панелей, систем энергоэффективного освещения и других элементов устойчивой инфраструктуры.

Адаптация к изменению климата: Учет прогнозов климатических изменений, дефицита ресурсов и будущих требований к мобильности в конструкции и материалах.

#### **4. Сравнительный анализ с Казахстаном и перспективы развития цементобетонных дорог**

##### **4.1 Материалы и составы**

В Казахстане цементобетон всё активнее применяется в дорожном строительстве, особенно на крупных магистралях. Используются прочные бетонные смеси с различными добавками, которые повышают долговечность покрытий. Особое внимание уделяется адаптации составов к климату и использованию местного сырья, включая вторичные материалы и промышленные отходы.

В многих странах также активно развиваются технологии бетонных дорог:

В США и Канаде широко применяют добавки, повышающие морозостойкость и прочность.

В Китае и Южной Корее используют современные составы с повышенной устойчивостью и долговечностью.

В Германии упор делается на экологичные материалы и переработку.

Казахстан движется в одном направлении, стремясь повышать качество и срок службы бетонных покрытий.

##### **4.2 Технологии и оборудование**

Строительство бетонных дорог в Казахстане выполняется с использованием современных машин, которые позволяют быстро и точно укладывать дорожное полотно. Для улучшения качества внедряются технологии контроля швов и условий твердения.

Во многих развитых странах активно применяются автоматизированные системы, роботы и цифровой контроль. Например, в Южной Корее и США используются беспилотные технологии и датчики, встроенные в дорожное покрытие.

##### **4.3 Долговечность и трещиностойкость**

Для повышения срока службы дорог в Казахстане используются прочные материалы, специальные добавки и технологии по защите от перепадов температур и влаги. Также проводится регулярный контроль качества.

Международный опыт показывает, что долговечность бетонных покрытий можно повысить с помощью армирования, оптимальных составов и правильного проектирования швов. Эти подходы также учитываются в казахстанской практике.

##### **4.4 Мониторинг и цифровизация**

Цифровизация дорожной инфраструктуры в Казахстане развивается — внедряются электронные паспорта объектов, системы мониторинга, используются геоинформационные технологии. Всё это помогает своевременно отслеживать состояние дорог и проводить профилактический ремонт.

В других странах, особенно в Южной Корее, цифровые технологии уже давно стали стандартом — дороги оборудуются датчиками, а управление осуществляется в автоматическом режиме. Казахстан стремится к таким решениям, особенно на новых и стратегически важных объектах.

#### **4.5 Экология и устойчивое развитие**

В дорожном строительстве Казахстан делает акцент на экологичность — это проявляется в использовании переработанных материалов, снижении выбросов и повышении энергоэффективности. Также развивается направление «зелёных» технологий и устойчивого строительства.

Мировой опыт подтверждает актуальность этого подхода: страны активно снижают углеродный след дорожных работ, используют вторсырьё и новые экологичные составы. Казахстан стремится к тому же, внедряя экологические стандарты и инновации.

Опыт Казахстана в развитии цементобетонных дорог показывает стремление к современному, качественному и устойчивому подходу в строительстве. Основные направления — повышение долговечности, цифровизация, экологичность и применение новых технологий.

Сравнение с международной практикой подтверждает, что Казахстан движется в правильном направлении, адаптируя передовые решения к своим условиям и ресурсам. В перспективе это позволит создавать надёжную и эффективную дорожную сеть, отвечающую современным требованиям.

#### **5.1 Возможности применения зарубежных практик**

Международный опыт (США, Канада, Германия, Южная Корея, Китай) демонстрирует эффективность современных решений в области долговечных бетонных покрытий, цифровизации контроля, экологичности и автоматизации строительных процессов. Казахстан имеет потенциал к внедрению следующих зарубежных практик:

- технологии механизированной и бесперебойной;
- применение цифровых систем мониторинга состояния покрытия;
- использование шлаков, зол и вторичных материалов;
- внедрение BIM, цифровых двойников и автоматизированного управления строительством.

Адаптация этих решений с учётом местных климатических и инфраструктурных условий способна повысить качество и срок службы дорожных покрытий.

#### **5.2 Необходимость локальных исследований**

Несмотря на активное развитие, многие зарубежные технологии требуют адаптации к суровому континентальному климату, специфике транспортных нагрузок и ресурсной базе Казахстана. Это создаёт необходимость:

- проведения лабораторных и полевых испытаний новых составов;
- оценки совместимости добавок с местным сырьём;
- разработки национальных нормативов и методик контроля качества;
- изучения долгосрочного поведения бетонных покрытий в региональных условиях.

Диссертационные и прикладные научные исследования играют ключевую роль в обеспечении научного обоснования и практической применимости таких решений.

### **5.3 Роль модифицирующих добавок в адаптации зарубежного опыта**

Модифицирующие добавки являются связующим звеном между международными стандартами и региональными условиями. Их применение позволяет:

- управлять сроками схватывания и твердения бетона при транспортировке на большие расстояния;
- повысить морозостойкость в условиях частых циклов замерзания-оттаивания;
- улучшить прочностные и эксплуатационные характеристики при использовании местного сырья (шлаки, зола, глина);
- снизить содержание цемента и углеродный след дорожных работ.

Таким образом, модификаторы становятся важным инструментом технологической адаптации и повышения эффективности бетонных дорог.

### **5.4 Рекомендации по развитию цементобетонных технологий в Казахстане**

- с учётом современных вызовов и возможностей предлагаются следующие направления развития:

- углубление научных исследований — формирование научно-обоснованных составов бетона, подходящих для различных климатических зон РК;
- расширение цифровизации — внедрение систем мониторинга, электронных паспортов дорог, цифровых моделей и предиктивной аналитики;
- масштабирование лучших практик — pilotные проекты с использованием новых технологий и материалов с последующим тиражированием;
- развитие нормативной базы — обновление стандартов с учётом международного опыта и отечественных исследований;
- повышение квалификации специалистов — обучение персонала новым методам проектирования, укладки и контроля качества.
- комплексная реализация этих мер позволит обеспечить устойчивое развитие цементобетонных дорог в Казахстане с учётом международных стандартов и национальных интересов.

## **Заключение**

За последнее десятилетие во многих странах наблюдается устойчивый рост интереса к цементобетонным дорогам как более долговечной и устойчивой альтернативе традиционным асфальтобетонным покрытиям. Зарубежный опыт показывает эффективность таких решений, как использование шлаков и зол, модифицирующих добавок, цифровых систем мониторинга и механизированной укладки. Казахстан демонстрирует значительный прогресс в этом направлении, особенно в части применения местных материалов и технологий, адаптированных к климатическим условиям.

При этом выявлена необходимость в систематизации опыта, усилении научной базы и локализации технологий. Особое значение приобретают модифицирующие добавки, позволяющие адаптировать международные практики к условиям РК.

Практическая значимость для развития дорожной отрасли РК, полученные выводы и проведённый анализ позволяют:

- определить наиболее перспективные технологии и материалы для внедрения в РК;
- выработать рекомендации по модернизации нормативно-технической базы;
- способствовать устойчивому развитию дорожной отрасли за счёт повышения долговечности покрытий и сокращения затрат на ремонт;
- расширить применение промышленных отходов, что важно с точки зрения экологии и ресурсосбережения;
- стимулировать развитие отечественного производства добавок и компонентов для цементобетонных покрытий.

Таким образом, результаты исследования могут быть использованы в реальных проектах по проектированию, строительству и ремонту автомобильных дорог.

## Список литературы

1. Асматулаев Б. А. Перспективы использования техногенных отходов в дорожном строительстве Казахстана // neft-gas.kz. – [Электронный ресурс]. – URL: [https://neft-gas.kz/f/ba\\_asmatulaev.pdf](https://neft-gas.kz/f/ba_asmatulaev.pdf)
2. Wang, Y. et al. Advances in pavement concrete technology for a carbon-neutral future // Construction and Building Materials. – 2024. – URL: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S266616592400036X>
3. Zhang, Q., Li, Z., Wang, Y. Development and application of green concrete materials // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/988/5/052054/meta>
4. Yang, J., Kim, H. et al. Sustainable Road infrastructure in cold regions: a review // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2021. – URL: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756421001021>
5. Вопросы по оценке контроля качества цементобетонных покрытий // Журнал "Жаршы". – [Электронный ресурс]. – URL: [https://jarshy.qazjolgzi.kz/media/article/30/Вопросы\\_По\\_Оценке\\_Контроля\\_Качества.pdf](https://jarshy.qazjolgzi.kz/media/article/30/Вопросы_По_Оценке_Контроля_Качества.pdf)
6. Federal Highway Administration (FHWA). Long-Term Pavement Performance Program – Report No. FHWA-HRT-15-049. – 2015. – URL: <https://fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/15049/013.cfm>
7. Asphalt Pavement Alliance. Perpetual Pavement: Innovation for Long-Life Asphalt Pavements. – URL: [https://asphaltpavement.org/uploads/documents/AVP\\_PerpetualPavement\\_Flyer.pdf](https://asphaltpavement.org/uploads/documents/AVP_PerpetualPavement_Flyer.pdf)
8. Michigan DOT. Evaluation of Concrete Overlay Performance – Research Spotlight SPR-1722. – URL: <https://michigan.gov/mdot/-/media/Project/Websites/MDOT/Programs/Research-Administration/Research-Spotlights/SPR-1722-Spotlight.pdf>
9. Transportation Research Board. Transforming Transportation Infrastructure. – TR News, №339. – URL: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews339Transforming.pdf>
10. City of West Sacramento. 2025 Pavement Preservation Program. – URL: <https://cityofwestsacramento.org/government/departments/capital-projects/department/projects/2025-pavement-preservation-program>
11. Transportation Association of Canada (TAC). Pavement Preservation: An Effective Way of Dealing with Scarce Maintenance Budget. – URL: <https://tac-atc.ca/en/knowledge-centre/technical-resources-search/conference-papers/pavement-preservation-effective-way-of-dealing-with-scarce-maintenance-budget/>
12. Government of Nova Scotia. Five-Year Highway Improvement Plan 2013–2014. – URL: [https://novascotia.ca/tran/highways/5yearplan/gofurther13\\_14.asp](https://novascotia.ca/tran/highways/5yearplan/gofurther13_14.asp)
13. Lepech, M. et al. Life-Cycle Analysis of Sustainable Road Infrastructure Projects // SSRN. – 2021. – URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3982071](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3982071)
14. CEIC Data. China – Highway Length of Paved Cement Concrete Roads. – URL: <https://ceicdata.com/en/china/highway-length-of-highway/cn-highway-length-of-highway-paved-common-cement-concrete>
15. BBC Future. The Environmental Cost of China's Addiction to Cement. – 2024. – URL: <https://bbc.com/future/article/20240419-the-environmental-cost-of-chinas-addiction-to-cement>
16. Wu, H. et al. High-Performance Road Materials and Green Technologies for Smart Cities // Materials Reports: Sustainability & Energy. – 2025. – URL: <https://sciopen.com/article/10.26599/MRSE.2025.9520001>
17. Federal Ministry for Digital and Transport (Germany). BIM Masterplan for Federal Trunk Roads. – URL: <https://bmv.de/SharedDocs/EN/Documents/StB/bim-masterplan-englisch.pdf>

18. German Culture. Eco-Friendly Initiatives on Germany's Autobahns. – URL: <https://germanculture.com.ua/daily/autobahn-eco-friendly-initiatives-germany/>
19. Federal Highway Research Institute (BASt). Smart Roads in the 21st Century. – URL: <https://bast.de/EN/Publications/Media/S-roads-21st%20century.pdf>
20. Global Highways. South Korea's Future Roads Incorporating Technologies. – 2025. – URL: <https://globalhighways.com/wh1/news/south-koreas-future-roads-incorporating-technologies>
21. ITS Korea. Annual Report – 2015. – URL: [https://its-ap.org/pdf/Its\\_Korea\\_Annual\\_Report\\_2015.pdf](https://its-ap.org/pdf/Its_Korea_Annual_Report_2015.pdf)
22. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Korea). ITS Brochure. – URL: [https://molit.go.kr/upload/cyberJccr/pdf\\_file/ITS%20brochure.pdf](https://molit.go.kr/upload/cyberJccr/pdf_file/ITS%20brochure.pdf)
23. Roads & Bridges. Korean ITS Test Center and Traffic Management Technologies. – URL: <https://roadsbridges.com/transportation-management/intelligent-transportation-systems-news/10645393/its-korean-its-test-center-rolling-out-innovative-traffic-management-technologies>
24. Highways Today. Korea's ETRI Developing V2X Technologies. – 2025. – URL: <https://highways.today/2025/07/07/korea-etri-v2x/>

### **Сведения об авторах:**

Қабдрашит Джахархан Қайратұлы – PhD докторант, өнеркәсіптік және азаматтық құрылым технологиясы, КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана қ., Қазақстан Республикасы, djakharkhan@gmail.com

Қабдрашит Джахархан Қайратұлы – докторант PhD, технология промышленного и гражданского строительства, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Республика Казахстан, djakharkhan@gmail.com

Kabdrashit Dzhaharkhan Kairatuly – PhD doctoral student, industrial and civil construction technology, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Republic of Kazakhstan, djakharkhan@gmail.com

Өтебаев Әлібек Ақылбекұлы – магистрант, өнеркәсіптік және азаматтық құрылым технологиясы, КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана қ., Қазақстан Республикасы, alionepower02@gmail.com

Утебаев Алибек Ақылбекович – магистрант, кафедра технологии промышленного и гражданского строительства, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Республика Казахстан, alionepower02@gmail.com

Utebayev Alibek Aqylbekuly – master's student, Department of Industrial and Civil Construction Technology, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Republic of Kazakhstan, alionepower02@gmail.com

Ануарбеков Мурабек Жасуланұлы – магистрант, өнеркәсіптік және азаматтық құрылым технологиясы, КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана қ., Қазақстан Республикасы, mega.armor1@gmail.com

Ануарбеков Мурабек Жасуланович – магистрант, кафедра технологии промышленного и гражданского строительства, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Республика Казахстан, mega.armor1@gmail.com

Anuarbekov Murabek Zhasulanovich – master's student, Department of Industrial and Civil Construction Technology, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Republic of Kazakhstan, mega.armor1@gmail.com

### **Вклад авторов:**

Қабдрашит Д.Қ. – концепция, методология, анализ, визуализация, интерпретация, подготовка текста, редактирование.

Утебаев А.А. – сбор данных.

Ануарбеков М.Ж. – сбор данных.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

## ЦЕМЕНТ БЕТОН ЖОЛДАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ ДАМУЫ

**Д.Қ. Қабдравшит<sup>\*1</sup>, А.А. Утебаев<sup>1</sup>, М.Ж. Ануарбеков<sup>1</sup>**

«<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» Коммерциялық акционерлік қоғам, Астана қ., Қазақстан Республикасы

<sup>\*</sup>Корреспондент автор: djakharkhan@gmail.com

**Аннотация.** Бұл зерттеу алдыңғы қатарлы материалдарды, технологиялық шешімдерді, цифрландыруды және тұрақты құрылыш аспектілерін қоса алғанда, цемент-бетонды жол жабындарын дамытудың заманауи тенденцияларына шолу жасайды. Климаттық және эксплуатациялық жағдайларды ескере отырып, цемент-бетон жабындарының беріктігін, жарықшактарға төзімділігін және пайдалану сенімділігін арттырудың негізгі әлемдік тәжірибелері жинақталған.

Модификациялық қоспаларды қолдануда, механикаландырылған төсемде, өндірістік қалдықтарды пайдалануда және цифрлық бақылау әдістерін дамытуда он үрдістер пайда болған Қазақстанның жол саласының қазіргі жағдайымен салыстырмалы талдау жүргізілді. Озық тәжірибелерді континенттік климатқа және ұлттық инфрақұрылымның ерекшеліктеріне бейімдеуге бағытталған жергілікті ғылыми-тәжірибелік зерттеулердің өзектілігі атап өтілді.

Бетонның пайдалану сипаттамаларын жақсартуда және жабындардың тұрақтылығын қамтамасыз етуде негізгі элемент ретінде қоспаларды пайдалануға ерекше назар аударылады. Қорытындылар цемент-бетонды жолдар саласындағы отандық технологияларды одан әрі дамыту үшін негіз болып табылады. Түйін сөздер: цемент-бетонды жолдар, жол құрылышы, тұрақты даму, модификациялық қоспалар, жабындардың беріктігі, инфрақұрылымды цифрландыру, пайдалану сипаттамалары, жол төсемдері.

**Түйін сөздер:** цемент-бетонды жолдар, жол құрылышы, тұрақты даму, модификациялық қоспалар, жабындардың беріктігі, инфрақұрылымды цифрландыру, пайдалану сипаттамалары, жол төсемдері.

## STATE AND DEVELOPMENT OF CEMENT CONCRETE ROADS

**J.K. Kabdrazhit<sup>\*1</sup>, A.A. Utebaev<sup>1</sup>, M. Zh. Anuarbekov<sup>1</sup>**

\*<sup>1</sup>NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Republic of Kazakhstan

<sup>\*</sup>Corresponding author: djakharkhan@gmail.com

**Abstract.** This study provides an overview of modern trends in the development of cement concrete road pavements, including advanced materials, technological solutions, digitalization and aspects of sustainable construction. Key global practices for improving the durability, crack resistance and operational reliability of cement concrete pavements are summarized, taking into account climatic and operational conditions.

A comparative analysis is carried out with the current state of the road industry in Kazakhstan, where positive trends have emerged in the use of modifying additives, mechanized paving, the use of industrial waste and the development of digital control methods. The relevance of local scientific and practical research aimed at adapting best practices to the continental climate and the characteristics of the national infrastructure is noted.

Particular attention is paid to the use of additives as a key element in improving the performance characteristics of concrete and ensuring the stability of pavements. The findings form the basis for the further development of domestic technologies in the field of cement concrete roads.

**Keywords:** cement concrete roads, road construction, sustainable development, modifying additives, durability of pavements, digitalization of infrastructure, performance characteristics, road surfaces.



**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/>).