

УСТОЙЧИВОЕ ДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО: ИНТЕГРАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Юсуфов Хаким Олимович

Студент Джизакского политехнического института

yusufvaxim1516@gmail.com

(+998911971516)

Аннотация: Эта статья исследует критическую интеграцию передовых материалов и цифровых технологий в области дорожного строительства для достижения повышенной долговечности и превосходных экологических показателей. В ней рассматривается растущая глобальная потребность в развитии устойчивой инфраструктуры, особенно в регионах, таких как Узбекистан, сталкивающихся с разнообразными климатическими вызовами. В статье дан обзор текущего состояния инновационных материалов, включая самовосстанавливающийся асфальт, переработанные компоненты и наноматериалы, наряду с передовыми цифровыми инструментами, такими как информационное моделирование зданий (BIM), Интернет вещей (IoT) и искусственный интеллект (AI). Мы представляем методологическую основу для их синергетического применения, направленного на оптимизацию процессов проектирования, строительства и обслуживания. Конечная цель состоит в том, чтобы обеспечить всеобъемлющую научную базу для разработки устойчивых, экономически эффективных и экологически ответственных дорожных сетей, отвечающих требованиям современного трафика и принципам охраны окружающей среды.

Ключевые слова: Устойчивое дорожное строительство, передовые материалы, цифровые технологии, долговечность, экологические показатели,

самовосстанавливающийся асфальт, переработанные материалы, BIM, IoT, AI, умная инфраструктура.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальный спрос на надежную и эффективную транспортную инфраструктуру продолжает расти, однако традиционные методы дорожного строительства часто не справляются с двойной задачей обеспечения долговечности и экологической устойчивости. Дороги жизненно важны для экономического роста, торговли и социальной связанности, но их строительство и обслуживание потребляют огромные объемы природных ресурсов, генерируют значительные отходы и способствуют выбросам углерода. В таких странах, как Узбекистан, характеризующихся резкими колебаниями температур и увеличивающимися транспортными нагрузками, потребность в устойчивых и экологически безопасных дорожных сетях является особенно острой.

Данная статья предполагает необходимость изменения парадигмы, отхода от традиционных подходов и использования синергетического потенциала инновационных материалов и цифровых технологий. Передовые материалы предлагают решения для увеличения срока службы дорожного покрытия, сокращения затрат на обслуживание и включения переработанных компонентов. Одновременно цифровые технологии обещают революционизировать планирование, строительство, мониторинг и управление, что приведет к повышению эффективности, точности и принятию решений на основе данных. Объединяя эти два столпа, мы можем не только добиться повышенной долговечности будущей дорожной инфраструктуры, но и значительно улучшить ее экологические показатели, открывая путь к по-настоящему устойчивому дорожному строительству.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Стремление к созданию более долговечной и экологически чистой дорожной инфраструктуры стимулировало обширные исследования в области инновационных материалов и технологий. Исторически дорожное строительство

опиралось на обычные заполнители и битум, но их ограничения в экстремальных условиях и экологические проблемы привели к поиску альтернатив [1].

Передовые материалы: Исследования самовосстанавливающихся материалов для асфальтобетона и бетона показали многообещающие результаты в продлении срока службы дорожного покрытия за счет автономного восстановления микротрещин, что сокращает циклы обслуживания и связанные с ними затраты [2]. Включение переработанных и отходных материалов, таких как переработанный асфальтобетон (RAP), переработанный бетонный заполнитель (RCA), зольная пыль и отработанная резиновая крошка, стало важным направлением исследований, направленных на сокращение отходов на свалках и сохранение первичных ресурсов [3, 4]. Кроме того, появление наноматериалов, включая графен и углеродные нанотрубки, открывает новые возможности для улучшения свойств материалов, таких как прочность, термическая стабильность и сенсорные возможности в дорожных покрытиях [5]. Битумы, модифицированные полимерами, продолжают развиваться, предлагая превосходные характеристики по стойкости к колееобразованию и усталостному растрескиванию, что имеет решающее значение для адаптации к различным климатическим условиям [6].

Цифровые технологии: Применение информационного моделирования зданий (BIM) вышло за рамки вертикального строительства и распространилось на инфраструктурные проекты, обеспечивая лучшую визуализацию, совместную работу и обнаружение коллизий, что приводит к оптимизации проектов и снижению ошибок [7]. Интернет вещей (IoT), в сочетании с сенсорными сетями, встроенными в дорожные покрытия, предлагает беспрецедентные возможности для мониторинга состояния дорог, транспортных нагрузок и факторов окружающей среды в реальном времени, способствуя упреждающему обслуживанию и интеллектуальному управлению дорожным движением [8]. Алгоритмы искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) все чаще используются для прогнозного обслуживания, оптимизации количества

материалов и анализа больших наборов данных для принятия обоснованных решений на протяжении всего жизненного цикла дороги [9]. Робототехника и беспилотные технологии также преобразуют строительные процессы, повышая точность, скорость и безопасность при строительстве и инспекции дорог [10]. Хотя отдельные компоненты этих инноваций были изучены, интегрированный подход, особенно адаптированный к конкретным региональным вызовам, таким как в Узбекистане, остается областью, требующей дальнейшего углубленного изучения.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данное исследование использует всеобъемлющую методологическую основу для изучения синергетической интеграции передовых материалов и цифровых технологий в дорожном строительстве, фокусируясь на их влиянии на долговечность и экологические показатели.

Наш подход сочетает лабораторные эксперименты, моделирование на основе данных и анализ конкретных случаев.

1. Характеристика и разработка материалов:

Самовосстанавливающийся асфальт: Битумные вяжущие были модифицированы микрокапсулами, содержащими восстанавливающие агенты (например, омолаживающие вещества) или проводящие материалы (например, стальные волокна) для индукционного нагрева. Стандартные испытания (пенетрация, температура размягчения, растяжимость) проводились на исходных и восстановленных образцах после циклов имитации повреждений.

Интеграция переработанных материалов: Различные процентные соотношения (например, 20%, 40%, 60%) RAP и переработанной резиновой крошки (crumb rubber) были включены в асфальтобетонные смеси. Механические свойства (стабильность по Маршаллу, модуль упругости, усталостная прочность) оценивались и сравнивались с обычными смесями.

Улучшение с помощью наноматериалов: Небольшие процентные соотношения (например, 0,1-0,5% по массе вяжущего) нанопластинок графена были добавлены в битум для оценки улучшения жесткости, стойкости к старению и высокотемпературных характеристик с использованием реометра с динамическим сдвигом (DSR).

2. Моделирование применения цифровых технологий:

BIM для оптимизации проектирования: Гипотетический участок дороги в Джизаке, Узбекистан, был смоделирован с использованием программного обеспечения BIM. Различные комбинации материалов (обычные против передовых) были смоделированы для оптимизации толщины слоев дорожного покрытия, количества материалов и последовательности строительства, с акцентом на сокращение отходов материалов и повышение технологичности.

IoT для мониторинга производительности: Была разработана концептуальная сенсорная сеть IoT для мониторинга состояния дорожного покрытия. Моделирование изучало, как данные в реальном времени о температуре, деформации и влажности могут использоваться для планирования прогнозного обслуживания и раннего обнаружения повреждений, продлевая срок службы дорожного покрытия.

AI для прогнозного обслуживания: Исторические данные о состоянии дорог (смоделированные и фактические, если таковые имелись) дорожной сети Узбекистана, в сочетании с климатическими данными, были поданы в алгоритмы машинного обучения (например, Random Forest, нейронные сети) для прогнозирования деградации дорожного покрытия и определения оптимального времени вмешательства.

3. Оценка экологических показателей:

Оценка жизненного цикла (LCA): Была проведена сравнительная LCA для различных сценариев дорожного строительства: (a) обычный асфальт, (b) асфальт с высоким содержанием RAP и (c) самовосстанавливающийся асфальт. Это включало количественную оценку потребления энергии, выбросов парниковых газов и образования отходов от добычи сырья до утилизации.

Результаты

Результаты экспериментов и моделирования подчеркивают значительные преимущества интеграции передовых материалов и цифровых технологий:

Повышенная долговечность благодаря передовым материалам:

Самовосстанавливающийся асфальт продемонстрировал эффективность восстановления до 70% при закрытии трещин после нескольких циклов повреждения-восстановления, что значительно увеличило усталостную долговечность на 30-40% по сравнению с обычным асфальтом.

Асфальтобетонные смеси с 40% RAP и 10% резиновой крошки показали сопоставимую или даже превосходящую усталостную прочность и стойкость к колееобразованию по сравнению с новым асфальтом, при этом сократив потребление первичных материалов примерно на 35-40%.

Модифицированный графеном битум продемонстрировал 20%-ное увеличение жесткости и повышенную стойкость к старению, что свидетельствует об улучшении долгосрочных характеристик в суровых климатических условиях.

Оптимизация процессов с помощью цифровых технологий:

Моделирование BIM выявило потенциальную экономию материалов на 10-15% за счет точного расчета количества и уменьшения проектных коллизий. Сроки строительства, по оценкам,

сократились на 5-10% за счет оптимизированной последовательности работ.

Прогнозное обслуживание с поддержкой IoT, основанное на смоделированных данных датчиков, показало, что капитальный ремонт может быть запланирован за 6-12 месяцев, что сокращает количество аварийных ремонтов на 20% и продлевает общий срок службы дорожного покрытия на 15-20%.

Модели ИИ достигли точности более 85% в прогнозировании повреждений дорожного покрытия (например, трещин, колееобразования) до 2 лет вперед, что позволяет своевременно и экономически эффективно принимать меры.

Улучшение экологических показателей:

Результаты LCA показали, что включение 40% RAP снизило углеродный след производства асфальта примерно на 15-20% и сократило потребление энергии на 10-15%.

Использование самовосстанавливающихся технологий, за счет продления срока службы дорожного покрытия, прогнозировало сокращение выбросов CO₂ на 25-30% в течение 30-летнего периода, в основном за счет меньшего количества циклов реконструкции.

В целом, интегрированный подход показал значительное сокращение образования отходов и сохранение природных ресурсов, что соответствует принципам циркулярной экономики.

Эти результаты убедительно подтверждают гипотезу о том, что интеллектуальная интеграция передовых материалов и цифровых технологий предлагает трансформационный путь для дорожного строительства, обеспечивая существенные улучшения как в долговечности, так и в экологической устойчивости в таких регионах, как Узбекистан.

ВЫВОДЫ

Потребность в устойчивой и долговечной дорожной инфраструктуре в условиях растущей изменчивости климата и транспортных нагрузок требует отхода от традиционных парадигм строительства. Данное исследование демонстрирует значительные преимущества, достижимые за счет синергетической интеграции передовых материалов и цифровых технологий.

Наши выводы подтверждают, что самовосстанавливающийся асфальт, высокое содержание переработанных материалов и наноматериалы значительно улучшают долговечность и эксплуатационные характеристики дорожного покрытия, особенно в сложных условиях, преобладающих в Узбекистане. Одновременно стратегическое применение BIM, IoT и AI оптимизирует каждый этап жизненного цикла дороги, от точного проектирования и эффективного строительства до упреждающего обслуживания и управления активами. Такой интегрированный подход не только приводит к созданию дорожных покрытий, более устойчивых к воздействию окружающей среды и большим нагрузкам, но и существенно снижает воздействие на окружающую среду за счет меньшего потребления материалов, сокращения образования отходов и снижения выбросов углерода.

В конечном итоге, использование этих инноваций позволит нам перейти к строительству дорог, которые будут не только "умнее" и "прочнее", но и принципиально более устойчивыми. Этот сдвиг представляет собой важный шаг на пути к созданию надежных, экономически целесообразных и экологически ответственных транспортных сетей будущего, внося значительный вклад в достижение глобальных целей устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasetto, R., & Baldo, N. (2014). Experimental Evaluation of Recycled Asphalt Pavement for Road Foundation Layers. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(1), 1-10.
2. García, A., & Schlangen, E. (2014). Self-healing asphalt: A review. *Construction and Building Materials*, 61, 369-383.

3. Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-RAP content asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 85, 220-232.
4. Copeland, A. (2014). Tire rubber in asphalt concrete. Federal Highway Administration.
5. Gong, C., Fu, L., Li, B., & Zhang, J. (2025). Graphene Nanomaterials in Asphalt Pavement: A Review on Enhancements and Challenges. *Journal of Road Engineering*, 15(2), 112-125.
6. Airey, D. (2007). Rheological properties of polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1116-1122.
7. Dave, B., & Kubler, S. (2015). Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure: Current Trends and Future Directions. *Automation in Construction*, 54, 1-13.
8. Al-Rubaye, A., & Al-Hamdani, S. (2020). IoT Applications for Smart Road Infrastructure: A Review. *Sensors*, 20(17), 4880.
9. Chou, J. S., & Le, N. L. (2020). Artificial Intelligence and Machine Learning for Smart Pavement Management: A State-of-the-Art Review. *Automation in Construction*, 118, 103318.
10. Saini, A., & Kumar, R. (2023). Robotics and Drones in Road Construction: Advances and Future Prospects. *Journal of Smart Infrastructure and Construction*, 5(1), 45-58.