

Адаптены: концепция программируемых дорожно-строительных материалов с триггерной активацией

Алексей Александрович Игнатъев¹ , Юрий Эммануилович Васильев¹ , Андрей Александрович Коптев¹ , Илья Александрович Чижиков^{2*} , Павел Алексеевич Слепнев² 

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: chizhikovia@mgsu.ru, a.ignatyev@madi.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. За период с 2015 по 2025 г. мировой рынок самовосстанавливающихся материалов вырос с 0,5 млрд долл. до 2,5 млрд долл., увеличившись почти в пять раз, а прогноз до 2033 г. предполагает дальнейший рост до 14,6 млрд долл. (CAGR 21,1%). Число научных публикаций по теме самовосстановления и программируемых материалов в международных базах цитирования демонстрирует экспоненциальный прирост. Вместе с тем единой концепции, объединяющей адаптивность, программируемость, самовосстановление, управление свойствами, триггерную активацию в рамках одного технологического подхода, до настоящего времени не предложено, что значительно усложняет внедрение инновационных материалов и решений в реальную практику. **Методы и материалы.** В рамках проводимого исследования проведена серия испытаний песка мелкого и грунтоизвестковой смеси на его основе на приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ с определением оптимальной влажности и времени выдерживания при оптимальной влажности. Проанализирована роль наноразмерных эффектов в виде расклинивающего давления по Б.В. Дерягину, нанокапсулированию и каталитической активности частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$. **Результаты.** Время выдерживания мелкого песка при оптимальной влажности – 6 ч; грунтоизвестковой смеси – 2 ч (трехкратное сокращение). Трехкратное ускорение гидратационного триггера обусловлено каталитическими ионообменными реакциями, инициируемыми наноразмерными кристаллитами $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в приповерхностном слое минеральных частиц. **Обсуждение.** Анализ мировых исследований показывает, что существующая терминология не охватывает системы с сочетанием метастабильного хранения, триггерной активации и контролируемой изменчивости свойств. Авторами предложен новый термин «адаптен» – метатермин для ресурсов, материалов и систем с контролируемой изменчивостью свойств и возможностью программирования на наноуровне. **Заключение.** Концепция адаптенов объединяет программируемое материаловедение, коллоидную химию и технологию переделов в едином подходе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адаптен, технологический передел, нанотехнологии, наноразмерные эффекты, нанокапсулирование, коллоидная химия, расклинивающее давление, дорожно-строительные материалы, асфальтобетон, вторичные ресурсы, самовосстанавливающиеся материалы

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Работа проведена в рамках выполнения Госзадания № FSFM-2024-0025 Инновационные технические решения и модифицирующая технология повышения работоспособности и долговечности автомобильных дорог. Разработка нового научно обоснованного и экспериментально подтвержденного метода расчета накопленных деформаций и мгновенной потери несущей способности усиленного земляного полотна и его основания при многоциклических динамических нагрузок.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Игнатъев А.А., Васильев Ю.Э., Коптев А.А., Чижиков И.А., Слепнев П.А. Адаптены: концепция программируемых дорожно-строительных материалов с триггерной активацией. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(4):457–468. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-457-468>. – EDN: OPFJDR.

Adaptenes: a concept for programmable road construction materials with trigger-responsive properties

Aleksey A. Ignatyev¹ , Yuriy E. Vasilyev¹ , Andrej A. Koptev¹ , Ilya A. Chizhikov^{2*} , Pavel A. Slepnev² 

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: chizhikovia@mgsu.ru, a.ignatyev@madi.ru

ABSTRACT

Introduction. Over the period from 2015 to 2025, the global market for self-healing materials grew from USD 0.5 billion to USD 2.5 billion – an almost fivefold increase – with forecasts projecting further growth to USD 14.6 billion by 2033 (CAGR 21.1%). The number of scientific publications on self-healing and programmable materials in international citation databases demonstrates exponential growth. Nevertheless, no unified concept has yet been proposed that integrates adaptability, programmability, self-healing, property control, and trigger activation within a single technological framework, which significantly complicates the implementation of innovative materials and solutions in real-world practice. **Materials and methods.** Within the framework of the present study, a series of tests was carried out on fine sand and a soil-lime mixture based on it using a SoyuzDorNII standard compaction apparatus, with determination of the optimum moisture content and the holding time at the optimum moisture content. The role of nanoscale effects was analyzed, including the wedging pressure according to B.V. Derjaguin, nanocapsulation, and the catalytic activity of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ particles. **Results.** The holding time of fine sand at the optimum moisture content was 6 h, while that of the soil-lime mixture was 2 h, representing a threefold reduction. The threefold acceleration of the hydration trigger is caused by catalytic ion-exchange reactions initiated by nanoscale $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystallites in the near-surface layer of mineral particles. **Discussion.** An analysis of global research shows that the existing terminology does not cover systems combining metastable storage, trigger activation, and controlled variability of properties. A new term, adapten, is proposed as a meta-term for resources, materials, and systems with controlled variability of properties and the possibility of programming at the nanoscale. **Conclusion.** The concept of adaptens integrates programmable materials science, colloid chemistry, and processing technology into a unified approach.

KEYWORDS: adapten, processing stage, nanotechnologies, nanoscale effects, nanocapsulation, colloid chemistry, wedging pressure, road-building materials, asphalt concrete, secondary resources, self-healing materials

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: The work was carried out as part of State Assignment No. FSFM 2024 0025 “Innovative Technical Solutions and Modifying Technology for Improving the Performance and Durability of Highways.” Development of a new scientifically substantiated and experimentally verified method for calculating accumulated deformations and the instantaneous loss of bearing capacity of the reinforced subgrade and its base under repeated cyclic dynamic loads.

FOR CITATION:

Ignatyev A.A., Vasilyev Yu.E., Koptev A.A., Chizhikov I.A., Slepnev P.A. Adaptenes: a concept for programmable road construction materials with trigger-responsive properties. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(4):457–468. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-457-468>. – EDN: OPFJDR.

ВВЕДЕНИЕ

Строительное материаловедение находится на пороге качественного сдвига (парадигмальный сдвиг): материалы с фиксированными свойствами постепенно уступают место адаптивным системам, параметры которых программируются заранее с учетом предстоящих условий эксплуатации. Мировой рынок самовосстанавливающихся материалов вырос с 1,1 млрд долл. в 2020 г. до 2,49 млрд долл. в 2024 г. при ожидаемом достижении 14,6 млрд долл. к 2033 г. (CAGR 21,1%) [1, 2]; число публикаций по данной

теме в базе Scopus, отражающее экспоненциальный рост с 2015 г., превысило к 2018 г. 217 работ только по направлению самовосстановления асфальта. Данная тенденция сохранилась и в настоящее время [3]. Одновременно объем переработанных и вторичных заполнителей в строительстве достиг 74,3 млн т в год только в Великобритании [4], а объем строительных отходов в ЕС составляет свыше 840 млн т в год, значительная часть которых вовлекается во вторичный оборот [5]. Единой концепции, объединяющей адаптивность, программируемость, самовосстановление и триггерную активацию в едином технологическом

подходе, до настоящего времени не предложено, что существенно затрудняет систематизацию и внедрение инновационных решений в реальную практику.

Ряд ведущих мировых научных центров уже внес существенный вклад в развитие обозначенных направлений, связанных с программируемыми материалами, адаптивными конструкциями и роботизированными системами. Группа Tangible Media в MIT Media Lab заложила концептуальную основу динамических объектов с управляемой физической формой через реализацию проекта inFORM. В настоящее время эти идеи продолжают развиваться в смежных исследованиях [6–7]. Институт Висса при Гарвардском университете (Wyss Institute) совместно с группой Дженнифер Льюис ведет исследования в области 4D-печати. Разработаны технологии непрерывного формования волокон из жидкокристаллических эластомеров с термически программируемыми свойствами, а также методы пространственно-управляемой ориентации и актуации в напечатанных конструкциях [8–10]. Группа Hyperbody в Делфтском технологическом университете, занимавшаяся адаптивными архитектурными компонентами со встроенными датчиками, прекратила существование в конце 2010-х годов, но тематику адаптивных и автоматизированных фасадных систем в университете продолжают развивать смежные исследовательские коллективы [11]. Исследовательский центр NASA Ames внес значительный вклад в создание роботизированных систем на принципах тенсегрити, где были разработаны концепции мягких планетарных роверов серии SUPERball, а в последующих работах — управляемых прыгающих тенсегрити-роботов для исследования планет [12, 13]. Программа DARPA «Programmable Matter» («Программируемое вещество»), реализованная в 2007–2012 годах, была официально завершена. Тем не менее ее идеологическое продолжение прослеживается в современных исследованиях, программируемых метаматериалах, способных выполнять механические вычисления и роботизированные функции [14].

В целом, можно говорить, что направление программируемых и адаптивных материалов активно развивается на мировом уровне — от фундаментальных исследований до прикладных разработок. Вопрос состоит в том, как реализовать эти принципы применительно к строительным и дорожно-строительным материалам, где ключевыми ограничениями являются масштаб производства, сезонность и экономика жизненного цикла.

С учетом широты темы далее будет сделан упор на практические результаты в строительной отрасли и отрасли дорожного хозяйства. При этом подходы, описанные в данной статье, могут быть эффективно использованы и в других отраслях промышленно-

сти. Описанные выше тенденции требуют пересмотра сложившихся подходов к проектированию и производству строительных и дорожно-строительных материалов. Требуется сквозная концепция, которая объединит достижения в области адаптивных, программируемых и самовосстанавливающихся материалов.

Анализ мирового опыта за последнее десятилетие позволил выделить несколько направлений, непосредственно связанных с проблематикой данной работы. Остановимся на самовосстанавливающихся материалах для дорожных покрытий.

Самовосстановление асфальтобетонных покрытий — одно из наиболее интенсивно развиваемых прикладных направлений, прямо связанных с проблематикой данной работы. Семан А. и соавторы [15] систематизировали подходы к самозалечиванию трещин в асфальтобетоне — молекулярную диффузию, капсулирование восстанавливающих агентов, индукционный нагрев — и подчеркнули, что самовосстановление представляет собой сложный физико-химический процесс. Лиу З. и соавторы [16] с применением нейтронной компьютерной томографии установили, что содержание наполнителя 20% по массе обеспечивает наилучшую скорость залечивания, при этом скорость процесса экспоненциально снижается со временем. Ли П. и соавторы [17] показали, что эпоксидные самовосстанавливающиеся микрокапсулы (содержание 4%) обеспечивают степень залечивания 67,8% — на 149,2% выше базового асфальтобетона. Ванг Х. и соавторы [18] установили, что капсулы из альгината кальция с отработанным кулинарным маслом дают степень восстановления свыше 90%. Анупам и соавторы [19] провели методологический обзор трех механизмов самозалечивания асфальтобетонов: микрокапсуляции, индукционного нагрева и омоложения битума. Хан К. и соавторы [20] выявили экспоненциальный рост публикаций по данной тематике после 2018 г. Активную работу в этом направлении ведут ученые из МГСУ. Так, в ряде публикаций [21–23] показано, как путем введения соответствующих добавок удалось получить эффект самозалечивания.

Параллельно активно развивается направление наномодификации асфальтобетонных смесей. Джек-симбаева А. и соавторы [24] показали, что нанодисперсные добавки по эффективности превосходят традиционные модификаторы — эластомеры, пластики, резиновую крошку. Росси К. и соавторы [25] установили, что нанодобавки в теплые асфальтобетонные смеси снижают температуру производства на 20–40 °С при сохранении или улучшении эксплуатационных характеристик. Сарсам С. и Машаан Н. [26] экспериментально подтвердили, что введение 2% кремнеземной пыли и 4% золы-уноса повышает усталостную долговечность асфальтобетона. Гарсия А. и соавторы [27] оптимизировали индукцион-

ный нагрев для самовосстанавливающихся асфальтовых смесей, обеспечив быстрый ремонт трещин. Табакович А. и другие авторы [28–30] рассмотрели три направления самовосстановления асфальтобетона — наноомоложение, индукционный нагрев и введение восстанавливающих агентов, — отметив индукционный нагрев наиболее технологичным.

Отдельного внимания заслуживают исследования, посвященные включению различных вторичных ресурсов и промышленных и бытовых отходов. Это направление за последнее десятилетие стало одним из ключевых в мировом пространстве. Хой М. и соавторы [31] в рамках десятилетней программы подтвердили повышенные механические свойства, улучшенную долговечность и экологическую безопасность геополимер-стабилизированных вторичных заполнителей. Салехи С. и соавторы [32] провели систематический обзор экологического и экономического анализа вторичных материалов. Яро Н. и соавторы [33] отметили, что применение биотоплива снижает выбросы CO₂ на 36–90%, парниковых газов — на 67–95%. Чинеше Е.Б. и соавторы [34] подтвердили экономическую и экологическую эффективность гранулята старого асфальтобетона (RAP) и переработанных автомобильных шин при ремонте покрытий. Каллайл А. и соавторы [29] установили, что умные адаптивные материалы повышают тепловую эффективность конструкций более чем на 30%, а аддитивное производство позволяет вовлекать до 50% отходов при снижении углеродного следа на 40–60%. Лиу К. и соавторы [16] систематизировали стратегии программирования механических метаматериалов — геометрическое, структурное и управляемое внешними воздействиями.

Анализ мировых исследований 2015–2025 гг. по трем направлениям: самовосстанавливающиеся

материалы, наномодифицированные дорожные смеси и вовлечение вторичных ресурсов — показывает, что все существующие подходы решают лишь отдельные локальные задачи. Это или восстановление после повреждения, либо улучшение одного свойства через добавки, либо снижение стоимости через рециклинг. Ни один из них не охватывает весь жизненный цикл материала — от получения при длительном хранении до контролируемой активации при заданных условиях и работы в конструкции с predetermined свойствами. Проанализировав более 500 научных публикаций по различным добавкам [35] и компонентам асфальтобетонных смесей (рис. 1), было установлено, что, несмотря на огромный объем исследований, качественного изменения принципов получения и работы дорожных материалов практически не достигнуто. Исследовательская группа под руководством д.т.н. Игнатъева А.А. на протяжении 3 лет развивает новое направление исследований в области технологических переделов — полуфабрикатов дорожно-строительных материалов длительного хранения на основе вторичных дисперсных ресурсов. В рамках данного направления разработаны теоретические основы и практические методы получения гранулированных смесей с программируемыми эксплуатационными свойствами, активируемыми посредством температурных, гидратационных и механических триггеров. Результаты исследований отражены в докторской диссертации и серии публикаций [35–38], в которых обоснованы наноразмерные механизмы структурообразования технологических переделов, количественно оценены технологические и экономические эффекты их применения, а также определены перспективы тиражирования данного подхода в смежных отраслях промышленности. Технологический передел — это

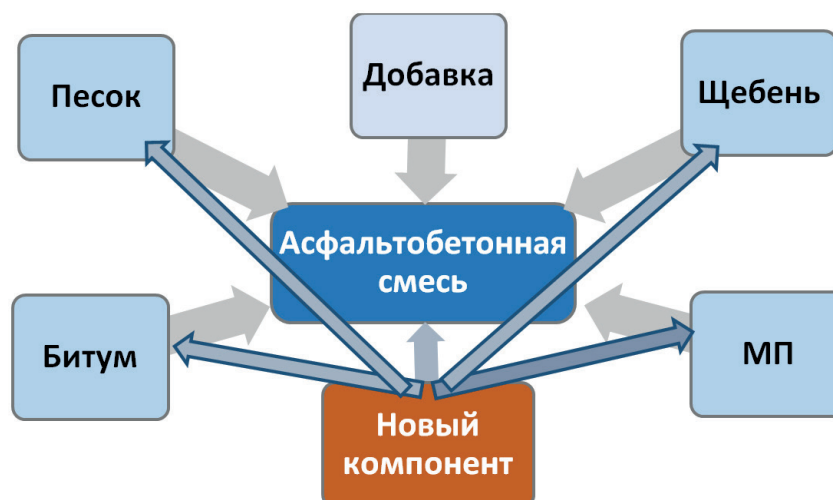


Рис. 1. Схема компонентного состава асфальтобетона

промежуточный продукт, прошедший частичную обработку, который способен длительно (до нескольких лет) храниться в метастабильном состоянии, а при воздействии внешнего или внутреннего триггера — температурного, гидратационного или механического — приобретает требуемые эксплуатационные свойства. Ключевое отличие передела от традиционного материала состоит в разделении этапов «производство» и «активация» во времени и пространстве. Так, передел производится централизованно и доставляется к объекту, а свойства реализуются на месте или в готовом материале (продукте) при воздействии внешнего триггера.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Теоретическая основа предлагаемой концепции была сформулирована в ходе развития теоретических предпосылок физической химии поверхностей и коллоидных систем, заложенных академиками Б.В. Дерягиным и П.А. Ребиндером [39, 40]. В нанозазоре между твердыми поверхностями минеральных частиц при толщине межфазного слоя единицы—десятки нанометров формируется расклинивающее давление, и поверхностная энергия межфазных взаимодействий становится доминирующей по сравнению с объемными механическими свойствами. Это объясняет, почему, например, минеральный порошок как основной компонент асфальтобетона при содержании 6–10% от массы смеси обеспечивает около 90% поверхности взаимодействия с вяжущим. Так, наноразмерная удельная поверхность создает многократно большее число наношелей с расклинивающим давлением, и мы получаем значительное упрочнение готовой композиции. Разработанная технология гранулирования окатыванием позволила реализовать принцип нанокапсулирования, при которой оболочка из минерального порошка и вяжущего в виде битума, модифицированного полиэтилентерефталатом, функционирует как нанобарьер, предотвращающий контакт активных компонентов с внешней средой при хранении и обеспечивающий контролируемое их высвобождение при воздействии определенного триггера (внешнего фактора) [38] — аналогично

принципу нанокапсул в самовосстанавливающихся асфальтобетонах [41–43], но данный эффект достигается без дорогостоящих синтетических полимерных оболочек, а за счет структурирования минеральных компонентов по типу «кирпичная кладка» (рис. 2). Подобная структура реализуется при использовании тарельчатого гранулятора.

Для верификации концепции технологического передела помимо гранулированных смесей была проведена серия испытаний с грунтами и укрепленными грунтами. Так, на двух видах материалов, песке мелком и грунтоизвестковой смеси на основе песка мелкого были проведены испытания по установлению времени выдерживания грунта при оптимальной влажности с оценкой технологических особенностей укладки и уплотнения. Испытания выполнялись в следующей последовательности:

1. Определение гранулометрического состава сытовым методом.
2. Определение содержания пылевато-глинистых частиц.
3. Определение оптимальной влажности и максимальной стандартной плотности на приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ.
4. Определение времени выдерживания грунта при оптимальной влажности для достижения повышенной стандартной плотности.

Образцы помещались в герметичные пакеты и выдерживались при оптимальной влажности в течение заданного времени (от 1 часа до 24 часов). Далее через каждый час отбиралась проба для определения плотности. Физико-химическая схема процессов при замачивании грунта (рис. 3) включала следующие стадии: сорбция кластеров воды на аутогенной пленке → поверхностная диффузия водной пленки → рост числа коллоидных продуктов → полное заполнение пор с набуханием оболочек зерен и проявлением демпфирующего эффекта. Каждая стадия соответствовала наноуровневым межфазным процессам, описываемым Б.В. Дерягиным. Характеристики исследуемого грунта приведены в таблице 1.

Состав грунтоизвестковой смеси подбирался с учетом рекомендаций разных стран (табл. 2) и было выбрано в качестве добавки 5% извести. Содержание извести назначалось исходя из типа грунта.

Традиционная технология смешения компонентов



Требуемая структура минеральных компонентов



Рис. 2. Роль минерального порошка в формировании структуры асфальтовяжущего



Рис. 3. Физико-химическая схема процессов при замачивании грунта

Таблица 1. Характеристики исследуемого грунта (песок мелкий)

Остаток	Остатки, % по массе на ситах						Содержание пылевато-глинистых частиц, %	Модуль крупности	Частицы крупнее, %	
	2мм	1мм	0,5 мм	0,25 мм	0,125 мм	< 0,125 мм			4мм	8мм
Полный	0,1	3,5	19,1	76,9	91,2	100	6,7	1,9	0	0
Частный	0,1	2,4	16,6	57,8	14,3	8,8				

Таблица 2. Рекомендации по содержанию извести в грунтоизвестковой смеси

Наименование конструктивного элемента автомобильной дороги	Содержание извести в грунтоизвестковой смеси, % от массы грунта		
	США	Швеция	Канада
Слои автомобильных дорог из несвязных грунтов	2–8	–	4 ± 0,5 5 ± 1
Слои автомобильных дорог из связных грунтов	5–8	6–8 для суглинков 8–10 для глин	4 ± 0,5 5 ± 1
Земляное полотно	3–6	–	4 ± 0,5 5 ± 1

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сначала была осуществлена оценка оптимальной влажности и затем время выдерживания исходного грунта и грунтоизвестковой смеси при оптимальной влажности. Оптимальная влажность мелкого песка, определенная методом стандартного уплотнения, составила 9,9% при максимальной плотности 1,679 г/см³ (рис. 4). Для грунтоизвестковой смеси оптимальная влажность – 11,2% при плотности 1,702 г/см³ (рис. 5). Рост оптимальной влажности на 1,3 п.п. и одновременное увеличение достигаемой плотности объясняются водопоглощением наноразмерных частиц Ca(OH)₂ и реакциями их гидратации,

в ходе которых в структуре смеси формируются дополнительные гидросиликатные и гидроалюминатные соединения.

Далее оценивалась кинетика структурообразования в процессе выдерживания грунта при оптимальной влажности. Результаты замачивания мелкого песка (рис. 6) показали, что оптимальное время выдерживания неукрепленного грунта составляет 6 часов. Кинетика показала интенсивный рост плотности в первые часы, а затем произошла смена и выход на плато, что свидетельствует о завершении перераспределения влаги и формировании оптимальной наноструктуры контактов зерен. Сводные данные по комплексному влиянию продолжительности за-

График стандартного уплотнения

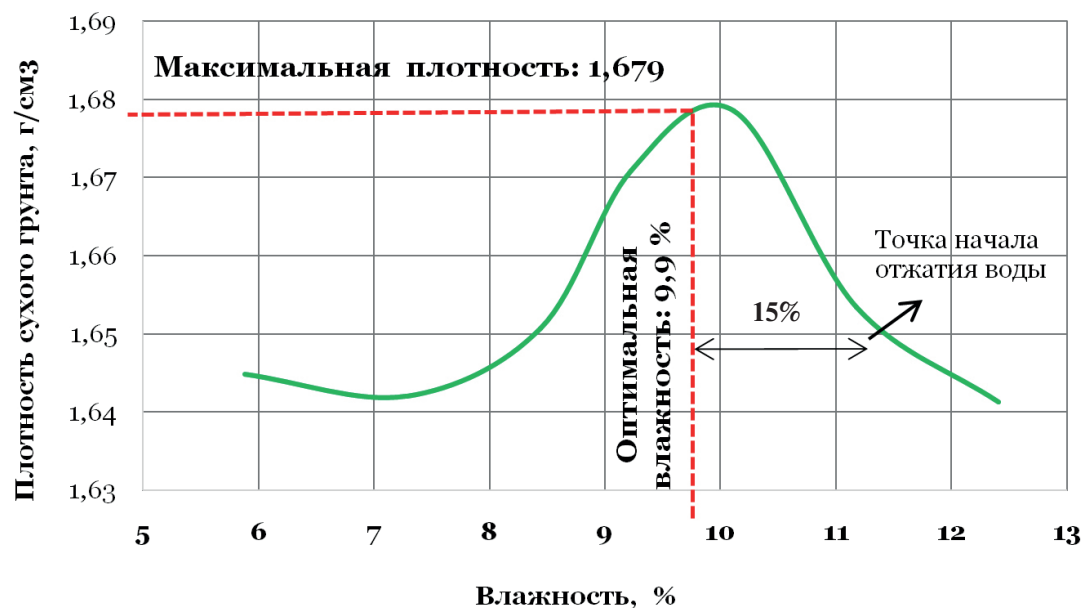


Рис. 4. Определение оптимальной влажности мелкого песка

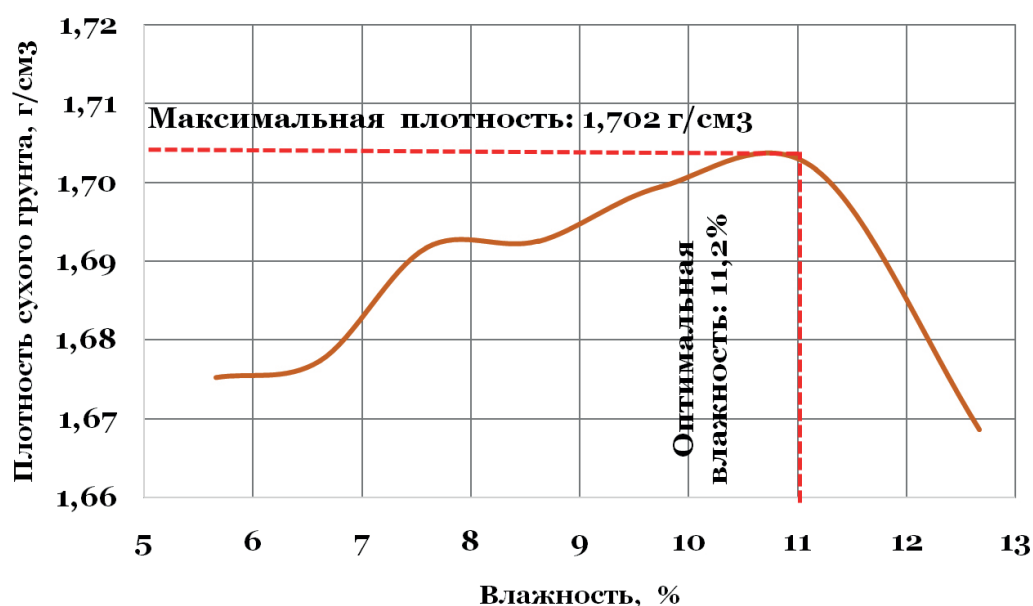


Рис. 5. Определение оптимальной влажности грунтоизвестковой смеси

мачивания на свойства грунта и данные о повышении эффективности работ приведены на рис. 7.

Для грунтоизвестковой смеси (технологический передел (полуфабрикат)) (рис. 7) оптимальное время выдерживания составило около 2 часов, что втрое меньше, чем для мелкого песка. Причина заключается в каталитическом действии наноразмерных частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с размером кристаллитов в диапазоне нескольких десятков нанометров и развитой

удельной поверхностью. При этом они инициируют ионообменные реакции и пуццолановые процессы непосредственно в нанометровом приповерхностном слое минеральных частиц. Физически это означает, что гидратационный триггер активируется в три раза быстрее, чем в системе без извести, при этом достигаемые плотность и несущая способность оказываются выше. Практическое следствие, которое можно сделать на основе проведенных испытаний,

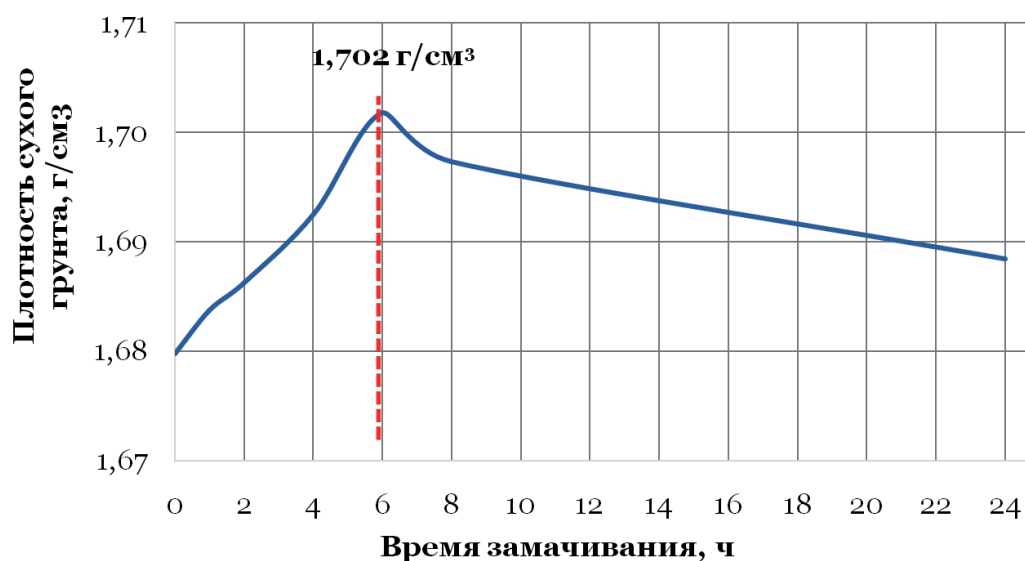


Рис. 6. Замачивание образцов мелкого песка

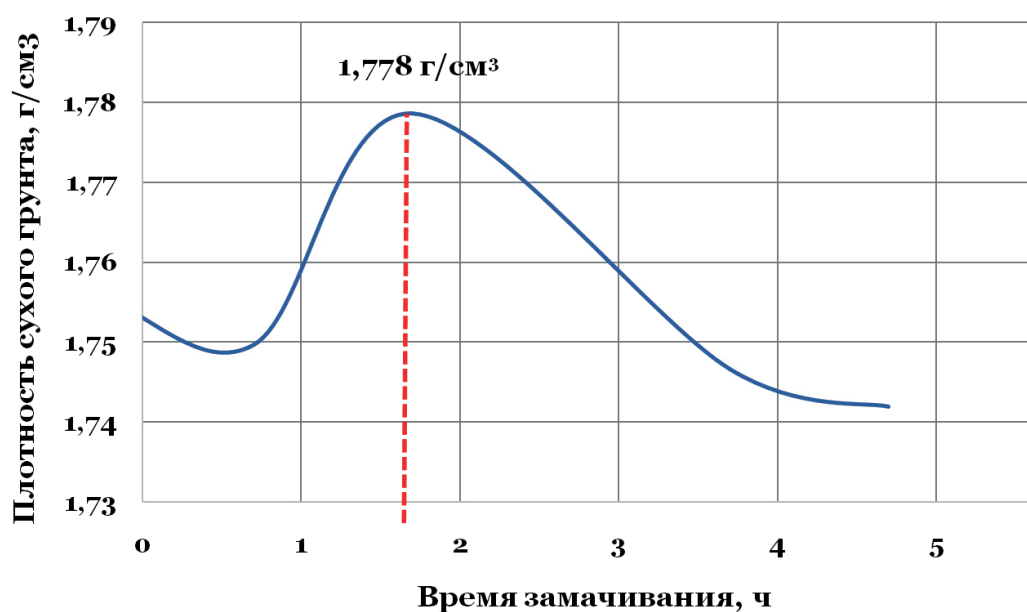


Рис. 7. Замачивание образцов грунтоизвестковой смеси

приводит к сокращению технологической паузы с 6 до 2 часов, что существенно повышает производительность работ по устройству дорожных оснований при сохранении и улучшении качества готового основания.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты в сочетании с проведенным анализом мировых исследований позволяют поставить более широкий вопрос: «Каким именно образом поведение исследованных систем, в целом,

связано с общей логикой развития современного материаловедения?»

По всем классическим строительным материалам — бетону, асфальтобетону, стали — отрасль подошла к пределу традиционного развития. Функциональность обеспечивается уже не изменением матрицы материала, а очевидной ролью вводимых добавок, перечень которых растет с огромной скоростью. В дорожной отрасли это особенно заметно. На рисунке 8 показаны этапы развития асфальтобетона, которые демонстрируют, что, несмотря на огромный объем исследований по добавкам и компонентам

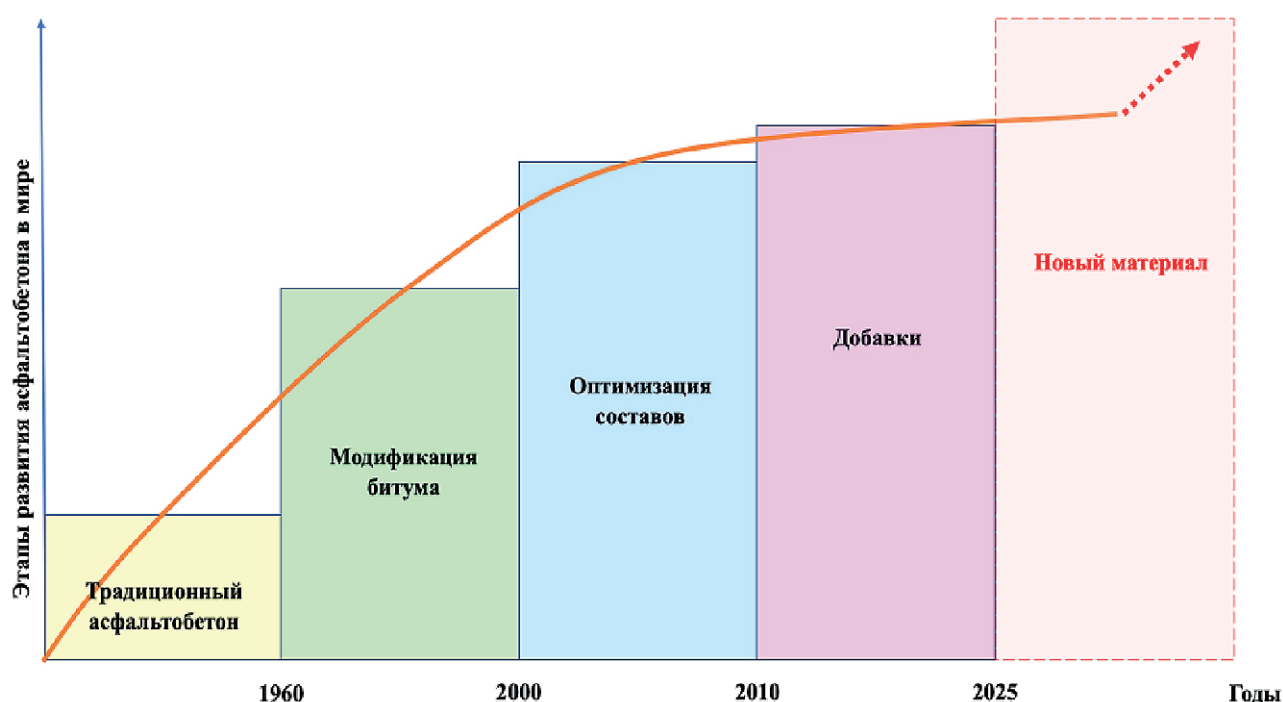


Рис. 8. Этапы развития асфальтобетона в мире

(рис. 1), качественного изменения принципов производства материала практически не достигнуто. В ходе анализа научных работ установлено, что в публикациях широко используются «бесструктурные термины» — классификации по происхождению отхода, по функционалу или по области применения. Между тем ни один из существующих терминов («вторичный ресурс», «гибрид», «умный», «программируемый», «самовосстанавливающийся») не охватывает весь спектр особенностей материала. Более того, существующая терминология не отражает и не способна описать скрытые потенциалы у создаваемых материалов, которые могут активироваться в заданный момент под действием определенного внешнего триггера. Представителем как раз такого рода систем и являются самозалечивающие системы, которые при появлении микротрещины активируются и могут осуществить самозалечивание.

Глубокое погружение в данную специфику и проведенный широкий круг исследований с различными материалами и вторичными ресурсами открыли принципиально новый угол зрения на происходящие в создаваемых системах процессы. Изученные ранее технологические переделы показали, что все их ключевые свойства определяются процессами на наноуровне, и дальнейшие исследования на примере песка, укрепленного известью, позволили определить, что вводимые добавки могут кардинальным образом изменять готовую систему и при правильном проектировании программировать новые свойства

во времени. Так, каталитическая активность наноразмерных частиц извести позволила ускорить гидратационный триггер в три раза, что экспериментально показано в настоящей работе. На примере влияния отдельных триггеров были выявлены адаптивные функции исследуемого процесса укрепления грунта. Изучение этих эффектов позволило сформулировать и новый принцип для получения и создания дорожных материалов — «не противостоять среде, а адаптироваться к ней». Фактически именно этот принцип сегодня формирует запрос на расширение объема исследований в этом направлении. Широкий круг проведенных исследований показал, что данный принцип позволяет создавать материалы, в которых можно управлять адаптацией к воздействию внешней среды. Именно это содержание авторы вкладывают в предлагаемый термин «адаптен» — метатермин для ресурсов, материалов и систем с контролируемой изменчивостью свойств, программируемый на наноуровне. В данном случае ключевыми признаками адаптена как нового класса материалов могут выступать активация при воздействии внешнего (иногда задаваемого) триггера, метастабильное состояние, длительное хранение (до нескольких лет) без потери качеств, достижение в конструкции свойств, недостижимых при традиционном производстве и ряд других свойств. Грунтоизвестковая смесь представляет собой наглядный пример адаптена. Ее свойства не являются фиксированными в момент приготовления, а программируются заранее и реализуются под

действием внешнего триггера. Роль такого триггера выполняет влага — точнее, контролируемое достижение оптимальной влажности и последующее выдерживание смеси в течение заданного времени. При контакте наноразмерных частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с водой запускаются ионообменные реакции и пуццолановые процессы в приповерхностном нанометровом слое минеральных частиц. Формируемые во времени при оптимальной влажности новообразования обеспечивают качественный скачок несущей способности и повышают связность структуры. Тем самым гидратационный триггер переводит смесь из метастабильного состояния полуфабриката в готовый конструктивный материал с заданными свойствами, которые при традиционном подходе, без введения извести и без выдерживания при оптимальной влажности во времени, принципиально недостижимы.

Именно поэтому введение термина «адаптен» позволит устранить существующий пробел в международной научной терминологии и откроет новые широкие возможности для получения уникальных материалов, объединенных единым подходом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

1. Строительное материаловедение стоит на пороге перехода от материалов с фиксированными свойствами к адаптивным системам с программируемыми характеристиками и параметрами. Классические материалы, такие как бетон, асфальтобетон, сталь, достигли предела своего развития, и требуется поиск новых решений. Ни одно из существующих направлений: самовосстановление, наномодификация, рециклинг — не отвечает единому подходу, охватывающему весь жизненный цикл материала от производства до работы в конструкции.

2. Мелкий песок как классический грунтовый материал характеризуется фиксированными свойствами, достигаемыми непосредственно в ходе механического уплотнения без возможности управления кинетикой структурообразования. Введение времени выдерживания при оптимальной влажности переводит материал в качественно иное состояние, где процессы перераспределения влаги, формирования водных пленок на поверхности зерен и накопления коллоидных продуктов способствуют формированию новой наноструктуры контактов. В результате еще неукрепленный грунт при грамотном технологическом управлении демонстрирует поведение, характерное для программируемых систем. Максимальная плотность $1,679 \text{ г/см}^3$ достигается не мгновенно, а по истечении 6 часов выдерживания, что свидетельствует о наличии управляемого временного окна активации.

3. Введение извести переводит грунт из категории управляемого, но пассивного материала в новое состояние. Смесь, реагируя с внешней влагой, запускает ионообменные и пуццолановые реакции на наноразмерной поверхности частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате оптимальное время выдерживания сокращается с 6 до 2 часов, достигаемая плотность возрастает до $1,702 \text{ г/см}^3$, а коэффициент водостойкости в ряде экспериментов превышает 1,0 — показатель, принципиально недостижимый для неукрепленного песка.

4. С учетом полученных результатов целесообразно ввести термин «адаптен» — метатермин для ресурсов, материалов и систем с контролируемой изменчивостью свойств, программируемых на наноуровне. Его введение позволит устранить существующий пробел в международной научной терминологии и создаст теоретическую основу для нового направления материаловедения, связанного с проектированием материалов с управляемыми характеристиками в процессе эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. P&S intelligence. *Self-healing materials market: analysis by material type, technology, application and region — Forecast 2030*. New York: P&S Intelligence; 2021. Available at: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/self-healing-materials-market> (accessed: 28.04.2026)
2. Grand view research. *self-healing materials market size, share & trends analysis report by product, by technology, by application, by region — Forecast to 2033*. Report ID GVR-1-68038-829-9. San Francisco: Grand View Research; 2025. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/self-healing-materials> (accessed: 28.04.2026)
3. Abejón R. Self-healing asphalt: a systematic bibliometric analysis for identification of hot research topics during the 2003–2018 period. *Materials*. 2021;14(3):565. <https://doi.org/10.3390/ma14030565>
4. Mineral Products Association (MPA). *Construction aggregates supply in Great Britain: primary, recycled and secondary aggregates*. London: MPA; 2025. Available at: <https://mineralproducts.org/News/2025/release31.aspx> (accessed: 28.04.2026)
5. Cantero B., Bravo M.E., Del Bosque I.F.S. et al. *Use of recycled aggregates in concrete*. JRC Science for Policy Report, JRC131294. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2023. <https://doi.org/10.2760/4566>

6. Johnson B.K., Naris M., Volchko V. et al. A multifunctional soft robotic shape display with high-speed actuation, sensing, and control. *Nature Communications*. 2023;14:4516. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39842-2>
7. Jang S.Y., Cho M., Kim H. et al. Dynamically reconfigurable shape-morphing and tactile display via hydraulically coupled mergeable and splittable PVC gel actuator. *Science Advances*. 2024;10(39):eadq2024. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adq2024>
8. Forman J., Kilic Afsar O., Nicita S. et al. FibeRobo: Fabricating 4D Fiber Interfaces by Continuous Drawing of Temperature Tunable Liquid Crystal Elastomers. In: *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '23)*. New York: ACM; 2023. Art. 19. <https://doi.org/10.1145/3586183.3606732>
9. Nicita S., Weaver J.C., Ishii H. et al. A framework for handweaving robotic textiles with liquid crystal elastomer fibers. *Scientific Reports*. 2025;15:16883. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97835-x>
10. Yap Y.L. et al. Spatially programmed alignment and actuation in printed liquid crystal elastomers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2025;122:e2414960122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2414960122>
11. de la Barra Luegmayer P., Brembilla E., Prieto A. et al. Influence of automated façades on comfort and energy: a critical review. *Energy and Buildings*. 2025;347:116290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116290>
12. Shah D.S., Booth J.W., Baines R.L. et al. Tensegrity Robotics. *Soft Robotics*. 2022;9(4):639–656. <https://doi.org/10.1089/soro.2020.0170>
13. Green J.J., Bozinovski D. et al. Steerable High-Jumping Tensegrity Robot for Space Exploration. *IEEE Transactions on Field Robotics*. 2025;2:805–815. <https://doi.org/10.1109/TFR.2025.3526805>
14. He Q., Ferracin S., Raney J.R. Programmable responsive metamaterials for mechanical computing and robotics. *Nature Computational Science*. 2024;4(8):567–573. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00673-w>
15. Seman A., Dorett D.D., Hasan M.M.M. et al. Review of Asphaltic Crack Healing Approaches and Its Mechanism. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021;2021:1093224. <https://doi.org/10.1155/2021/1093224>
16. Liu Z., Cavalli M.C., Kaestner A. et al. Characterizing the Self-Healing Asphalt Materials: A Neutron Imaging Study. *Advanced Engineering Materials*. 2024;26(24):2400764. <https://doi.org/10.1002/adem.202400764>
17. Li P., Ji R., Zhang C. et al. A Study on the Road Performance of the Self-Healing Microcapsule for Asphalt Pavement. *Materials*. 2025;18(15):3483. <https://doi.org/10.3390/ma18153483>
18. Wang H., Wu J., Yuan M.M. et al. Self-Healing Properties of Asphalt Concrete with Calcium Alginate Capsules Containing Different Healing Agents. *Materials*. 2022;15(16):5555. <https://doi.org/10.3390/ma15165555>
19. Anupam B.R. et al. A methodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 2022;329:127143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127143>
20. Khan K. et al. Research evolution on self-healing asphalt: a scientometric review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2023;62(1):331–356. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0331>
21. Inozemtsev S.S., Korolev E.V., Le H.T., Do T.T. Methods for assessing the self-healing properties of asphalt concrete [Metody otsenki svoystv samovossostavleniya asfal'tobetona]. *Construction Materials*. 2024;(10):37–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-37-46>
22. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Structural features of asphalt concretes when using self-healing capsules [Strukturnye osobennosti asfal'tobetonov pri ispol'zovanii kapsul dlya samovossostavleniya]. *Vestnik MGSU*. 2026;21(2):233–245. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2026.2.233-245>
23. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Theoretical description of the self-healing process in asphalt concrete [Teoreticheskoye opisaniye protsessa samovossostavleniya asfal'tobetona]. *Construction Materials*. 2025;(8):55–63. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-838-8-55-63>
24. Jexembayeva A., Korniejenko K., Aruova L. et al. An Overview of Micro- and Nano-Dispersion Additives for Asphalt and Bitumen for Road Construction. *Buildings*. 2023;13(12):2948. <https://doi.org/10.3390/buildings13122948>
25. Rossi C., Porto M., Calandra P. et al. The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology. *Nanomaterials*. 2020;10(6):1202. <https://doi.org/10.3390/nano10061202>
26. Sarsam S., Mashaan N. Detecting the Influence of Additives on Asphalt Concrete Durability. *Jurnal Kejuruteraan*. 2022;34(1):47–57. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-34\(1\)-05](https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-34(1)-05)
27. García A., Alonso-Troyano C., Llopis-Castelló D., Penalva-Salinas M. Induction Heating Optimization for Efficient Self-Healing in Asphalt Concrete. *Materials*. 2024;17(22):5602. <https://doi.org/10.3390/ma17225602>
28. García-Morales M. et al. Self-healing asphalt: A systematic bibliometric analysis. *Materials*. 2021;14(3):587. <https://doi.org/10.3390/ma14030587>
29. Kallayil A., Patadiya J., Kandasubramanian B. et al. Adaptive Smart Materials in Architecture: Enhancing Durability and Sustainability in Modern Construction. *ACS Omega*. 2025;10(14):13567–13592. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04943>
30. Tabaković A., Schlangen E. *Self-healing technology for asphalt pavements*. In: *Self-Healing Materials*. Cham: Springer; 2017;285–306.
31. Hoy M., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A. et al. Innovations in Recycled Construction Materials: Paving the Way towards Sustainable Road Infrastructure. *Frontiers in Built Environment*. 2024;10:1449970. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1449970>
32. Salehi S., Arashpour M., Kodikara J., Guppy R. Sustainable Pavement Construction: A Systematic Literature Review of Environmental and Economic Analysis of Recycled Materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021;313:127936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>

33. Yaro N., Ahmad A., Usman A. et al. A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements. *Processes*. 2023;11(7):2095. <https://doi.org/10.3390/pr11072095>
34. Chineche E.B., You Q., Li Q. et al. Valorization of Recycled Wastes in Pavement Preventive Maintenance. *Heliyon*. 2024;10(6):e27776. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27776>
35. Игнатьев А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы. *Известия КГАСУ*. 2023;(1):14–30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14 EDN: EXDWYX.
36. Игнатьев А.А. *Функционально устойчивые дорожные гранулированные смеси (переломы) длительного хранения: дис. ... д-ра техн. наук*. 2024. 388 с. EDN: HEWWHS.
37. Ignatyev A.A. Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024;(110):11002. <https://doi.org/10.4123/CUBS.110.2>
38. Игнатьев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М. Структурообразование и потребительские свойства гранулированных асфальтобетонных смесей с включением фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата. *Строительство и реконструкция*. 2023;(1):123–132. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-105-1-123-132> EDN: HAMQSO.
39. Ребиндер П.А. *Физико-химическая механика*. Москва: Знание; 1958. 64 с.
40. Дерягин Б.В. *Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок*. Москва: Наука; 1986. 206 с.
41. Xu S., García A., Su J. et al. Self-healing asphalt review: from idea to practice. *Advanced Materials Interfaces*. 2018;5(17):1800536. <https://doi.org/10.1002/admi.201800536>
42. Salih S.I. *Self-healing of cyclic loading damage in asphalt mixtures*. Nottingham: University of Nottingham; 2020.
43. Mirzababaei M. et al. Self-healing asphalt: a systematic bibliometric analysis for mapping of research. *Materials*. 2021;14(2):275. <https://doi.org/10.3390/ma14020275>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Игнатьев Алексей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, a.ignatyev@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1425-5330>

Васильев Юрий Эммануилович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, vashome@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1634-0152>

Коптев Андрей Александрович – аспирант кафедры «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, koptevandrew@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6012-7652>

Чижигов Илья Александрович – доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, chizhikovia@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2212-3501>

Слепнев Павел Александрович – доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, slepnevpa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2237-4436>

ВКЛАД АВТОРОВ

Игнатьев А.А. – научное руководство; концепция и методология исследования; разработка теоретической базы; написание исходного текста; итоговые выводы.

Васильев Ю.Э. – написание исходного текста; доработка текста.

Коптев А.А. – проведение экспериментов; сбор и обработка данных; написание экспериментальных разделов.

Чижигов И.А. – анализ литературы; анализ наноразмерных механизмов; доработка текста.

Слепнев П.А. – обработка данных; подготовка рисунков и таблиц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.04.2026; одобрена после рецензирования 12.08.2026; принята к публикации 18.08.2026.