



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/8

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83

Полуфабрикаты и технологические переделы: введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов

А.А. Игнатъев, А.Б. Бондарев, Д.А. Кочетков

Алексей Александрович Игнатъев^{1,*}, Дмитрий Андреевич Кочетков¹

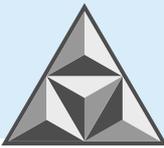
¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

*a.ignatyev@madi.ru**, *kdasoni@mail.ru*

Александр Борисович Бондарев²

²Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация

ialex-86@mail.ru



Представлены материалы исследований, соответствующие паспорту научной специальности «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Изучены вопросы организации производства, механизации и автоматизации технологических процессов производственных предприятий, обеспечивающих строительство, реконструкцию и эксплуатацию транспортных сооружений материалами, полуфабрикатами и изделиями, и описывающие особенности получения функционально устойчивых дорожных переделов и полуфабрикатов длительного хранения. Показано, что композиционные дорожные переделы и полуфабрикаты длительного хранения открывают широкие возможности для развития нового класса материалов, способных обеспечить повышение срока их службы. Данный класс материалов не подпадает под действие технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог». Приведены примеры таких композиционных переделов и полуфабрикатов. Введено новое понятие – триггерный материал, имеющий два и более фазовых состояния устойчивого равновесия и способный переходить из одного в другое при соответствующем воздействии бинарного характера (триггера).

Ключевые слова: дорожно-строительные материалы, полуфабрикаты, технологические переделы, триггерный материал, стандартизация, техническое регулирование, проверка соответствия

Для цитирования:

Игнатъев А.А., Бондарев А.Б., Кочетков Д.А. Полуфабрикаты и технологические переделы: введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 71-83. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83

Semi-finished products and processing stages: an introduction to the standardisation scope for a new class of road construction materials

A.A. Ignatyev, A.B. Bondarev, D.A. Kochetkov

Aleksey Alexandrovich Ignatyev^{1,*}, Dmitriy Andreevich Kochetkov¹

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

*a.ignatyev@madi.ru**, *kdasoni@mail.ru*

Aleksandr Borisovich Bondarev²

²Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

ialex-86@mail.ru



The paper presents research data corresponding to the curriculum for the academic program 'Design and Construction of Roads, Underground Railways, Aerodromes, Bridges and Transport Tunnels'. The authors have examined issues relating to the organisation of production, mechanisation and automation of technological processes at manufacturing enterprises that supply materials, semi-finished products and finished goods for the construction, reconstruction and operation of transport infrastructure, and describe the specific features of producing functionally stable road pavements and semi-finished products suitable for long-term storage. The paper demonstrates that composite road mixes and semi-finished products suitable for long-term storage open up broad opportunities for the development of a new class of materials capable of ensuring a longer service life. This class of materials does not apply to the technical regulations of the Customs Union 'Road Safety'. The paper provides examples of such composite road pavements and semi-finished products. The authors introduce a new concept – trigger material, i.e. a material possessing two or more phase states of stable equilibrium and capable of transitioning from one state to another upon the application of a corresponding binary stimulus (trigger).

Keywords: road construction materials, semi-finished products, processing stage, trigger material, standardization, technical regulation, compliance check

For citation:

Ignatyev A.A., Bondarev A.B., Kochetkov D.A. Semi-finished products and processing stages: an introduction to the standardisation scope for a new class of road construction materials // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 71-83. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83



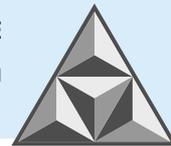
ВВЕДЕНИЕ

Нехватка научных знаний о методах получения технологических переделов и полуфабрикатов для дорожного строительства формирует запрос на более широкое изучение специфики их получения. Существующий уровень научных знаний в полной мере не обеспечивает выполнение постоянно растущих требований к качеству материалов и результатов дорожных работ. Потребность в новых материалах и конструктивных решениях для дорожных одежд, а также новых методах расчета конструкций, учитывающих реальное поведение материалов при различных погодных (температурно-влажностных) условиях, транспортных нагрузках и фазовых состояниях, может быть удовлетворена за счет разработки технологии получения композиционных полуфабрикатов длительного хранения. Такой подход открывает возможности для круглогодичного дорожного строительства, широкого использования местного и вторичного сырья, повышения качества устройства и срока эксплуатации дорожных покрытий без потери их эксплуатационных свойств. В [1-5] авторами представлен научный задел по созданию и применению гранулированных дорожных смесей длительного хранения, которые в ходе дальнейшего развития темы стали называть «технологическими переделами». Результаты основаны на морфологическом и феноменологическом анализе, а также системном подходе к межфазным взаимодействиям в материалах для строительства дорог. В частности, были предложены и исследованы функционально устойчивые дорожные смеси длительного хранения и разработаны гранулированные асфальтовые вяжущие на основе фосфогипса, гранулированные смеси на основе переработанного асфальтобетона, а также композиционные материалы для сорбции и переработки алюмосиликатного сырья. Экспериментальные работы [6,7] сопровождалось математическим моделированием межфазных контактов в системе «жидкость – твердое тело» и исследованием влияния структурирования на свойства композитов для дорожных покрытий.

Параллельно в отечественной [8-11] и мировой литературе [11-16] были представлены результаты исследований с использованием в составе таких сложных систем вторичных ресурсов и отходов промышленности [17-20], полимеров [21], а также свойства битумных эмульсий и суспензий [22-24], холодных асфальтобетонных смесей с диспергированным битумом, структурированных асфальтобетонов и связанные с ними технологические аспекты. Они подчеркивают высокую актуальность применения ресурсосберегающих и функционально ориентированных подходов. Однако при этом, как правило, материалы рассматривают в рамках действующей нормативной парадигмы, не выделяя полуфабрикаты и технологические переделы как самостоятельный объект стандартизации. Публикации [1-7] в целом отражают достигнутый научно-технический уровень разработки данной темы и являются подтверждением идеи авторов настоящей работы о необходимости организации нового класса дорожно-строительных материалов (и нового научного направления), в основе которого лежат полуфабрикаты и технологические переделы. При этом их функциональные свойства формируются на месте производства дорожных работ или по месту применения в качестве конструктивных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ АВТОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В [1] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленные на изучение особенностей применения полуфабрикатов длительного хранения



на автомобильных дорогах общего пользования. Характерно, что новый материал получают с применением технологической операции гранулирования окатыванием. При этом автором [1] изучены специфические свойства и характеристики вторичных материалов (фосфогипс, полиэтилентерефталат, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона), допускающие возможность их включения в состав гранулированных смесей. Итоги математического моделирования, описывающего процессы на уровне межфазного взаимодействия в системе «жидкость – твердое», коррелируются с результатами апробации на реальных объектах автомобильных дорог.

На основе проведенных экспериментальных исследований были сформированы и испытаны более 200 составов гранулированных материалов, содержащие переработанное промышленное сырье, в том числе – вторичные продукты фосфатного производства, твердые солевые и гипсовые осадки, крошка асфальтобетона. Ключевой характеристикой разработанных составов является достижение стабильных свойств дорожного материала при организации продолжительного хранения подготовленных систем.

В ходе исследований было установлено, что процесс уплотнения гранулированных смесей целесообразно осуществлять в интервале 20-120°C, при котором достигаются улучшенные механические показатели, включая повышенную устойчивость к воздействию влаги. При этом оптимальные результаты получены при 80-100°C в процессе уплотнения, что позволяет существенно (на 40°C) снизить энергозатратность технологической операции. Такое снижение становится возможным благодаря специфике конструирования и способу формирования полуфабрикатов.

На практике были также апробированы и внедрены составы гранулированных материалов (технологических переделов) для проведения ремонтно-восстановительных операций на автомобильных дорогах, с учетом использования традиционной техники, машин и оборудования. Разработаны технологические регламенты для внедрения полученных результатов, ориентированные на производство гранулированных смесей (технологических переделов) с расширенным сроком хранения и применение их в качестве восстановительных составов в работах с асфальтобетонными покрытиями.

Предложенная технология гранулирования путем окатывания обеспечила получение компактных систем (технологических переделов) со стабильными характеристиками при их хранении, что гарантирует достижение организованного строения дисперсного компонента (без пустот и дефектных зон). Получаемые гранулированные системы представляют собой завершённый полупродукт технологического цикла (полуфабрикат).

Данное направление исследований сопоставимо с исследованием близких аналогов – битумных суспензий и холодных складированных асфальтобетонных смесей на основе вязкого диспергированного битума [21-24].

Суспензии относятся к категории грубодисперсных коллоидных систем, отличаясь от связанных дисперсных материалов (например, паст) отсутствием прочной структурной сетки. В суспензионных системах частицы дисперсной фазы способны беспрепятственно передвигаться под влиянием гравитационного поля, что определяет их термодинамическую нестабильность.

Когда дисперсность материала возрастает, увеличивается свободная энергия поверхности раздела между фазами. Повышенная поверхностная энергия обеспечивает естественное стремление системы к изменению дисперсности путем объединения мелких частиц в более крупные образования. Если процесс диспергирования вязкого вещества (например, битума)



осуществляется непосредственно в водной среде, на межфазной границе начинают развиваться процессы, направленные на минимизацию поверхностной энергии. Эти процессы приводят к укрупнению частиц дисперсной фазы, что неизбежно снижает качественные характеристики композиции для дорожных работ.

Следовательно, при создании устойчивых композиций для дорожного строительства, способных сохранять свойства в течение длительного периода, необходимо не только обеспечить необходимую степень дисперсности, но и гарантировать условия, при которых дисперсность будет надежно закреплена.

В наших композициях на основе вязких органических компонентов высокая дисперсность и структурная однородность достигается благодаря применению особого способа стабилизации. Сущность этого способа состоит в распределении капель вязкого дорожного материала, находящегося в пластичном состоянии, в среде тонко измельченных минеральных частиц. Каждая капля покрывается защитной оболочкой из этого минерального материала.

Стабилизирующий эффект достигается за счет предотвращения слияния капель между собой. Это становится возможным благодаря тому, что контактирующие элементы дисперсной системы (минеральные зерна и покрытые оболочкой капли) химически идентичны. Подобная конструкция исключает прямой контакт вязких капель, препятствуя их агломерации и сохраняя высокий уровень дисперсности во всем объеме материала.

Технологический процесс получения такой композиции предусматривает введение нагретого вязкого материала в активно перемешиваемую водную суспензию, содержащую минеральные частицы, при температуре окружающей среды. Интенсивное перемешивание обеспечивает непрерывное разделение вязкого материала на более мелкие фрагменты, одновременно покрывая каждый из них защитным слоем минеральных частиц.

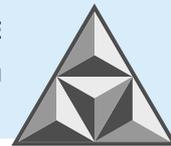
Данный механизм реализуется за счет действия межмолекулярных взаимодействий на границах раздела трехфазной системы: «органический материал – водная среда – минеральные частицы». При попадании горячего вязкого материала в суспензию образуется паровоздушная смесь. Газовая прослойка замедляет теплообмен между взаимодействующими средами, способствуя растяжению и истончению струйки вязкого материала. Мельчайшие капельки почти мгновенно обволакиваются защитным слоем минеральных частиц.

Образование мелких капельных частиц существенно усиливает адгезионные взаимодействия между органическим материалом и твердыми минеральными компонентами. Процесс перемешивания при окружающей температуре обеспечивает сохранение пластичного состояния внутри защитной оболочки как при хранении, так и последующей транспортировке.

Электростатические взаимодействия также играют роль в стабилизации. Минеральные частицы и сформировавшиеся оболочки капель имеют одноименный электрический заряд, что исключает их электростатическое притяжение и предотвращает формирование крупных агрегатов.

Минеральные частицы играют роль структурно-механического стабилизатора, создавая физический барьер между вязкими каплями. Этот барьер препятствует их сближению и объединению в крупные образования, тем самым сохраняя и поддерживая достигнутую степень дисперсности и структурную однородность системы.

Когда вокруг охлажденных до пластичного состояния капель образуется двухфазная оболочка, содержащая воду и минеральные компоненты, это обеспечивает композиции антифризные свойства. Во время процесса диспергирования органического материала в



увлажненной минеральной среде происходит насыщение водной фазы органическими и минеральными компонентами. Растворенные вещества изменяют физико-химические свойства воды, снижая температуру ее замерзания. При правильном подборе состава выделяемая вода остается подвижной при довольно низких температурах, вплоть до -15°C .

Сохранение органического материала в пластичном состоянии внутри защитной оболочки значительно упрощает применение композиции при осуществлении дорожных работ.

Использование полученной композиции требует лишь добавления воды, а также минеральной крошки (различные фракции), песка и других компонентов в соответствии с рецептурой, определяемой назначением смеси. После перемешивания материал становится готовым к распределению и уплотнению.

При уплотнении рабочей смеси содержащаяся в ней влага выходит на поверхность и испаряется. Капли органического материала, находящиеся в минеральной оболочке, разрушаются и образуют однородное поверхностное покрытие, близкое по свойствам к традиционным мастичным и асфальтобетонным покрытиям.

Модернизация производственных установок для получения таких композиций не требуется. Процесс может быть реализован путем введения необходимых технологических операций в программное управление существующим оборудованием либо посредством корректировки рецептурных параметров в заводских программах.

Исключение нагрева композиции перед нанесением на рабочую поверхность существенно сокращает трудовые и энергетические затраты на ее применение, способствует повышению экономичности процесса.

На микрофотографии (рис. 1, *a*) полученной композиции, разбавленной водой, подавляющее большинство капель органического материала имеют размеры, сопоставимые или даже меньшие, чем диаметр человеческого волоса, использованного в качестве эталона для масштабирования.



Рис. 1. Битумная суспензия: фото под микроскопом (*a*), буртование (*b*) и упаковка в мешки на склад битумной суспензии и холодной асфальтобетонной смеси с диспергированным битумом типа Б2 (*в*)
Fig. 1. Bituminous suspension: microscopic image (*a*), stockpiling (*b*) and bagging of bituminous suspension and cold asphalt concrete mixture with dispersed bitumen type B2 (*c*)

Отдельные волокна дополнительных укрепляющих добавок хорошо просматриваются в центральной части образца. Также наглядно демонстрируется возможность складирования и упаковки полученного материала в стандартную тару без ущерба для его свойств.

На рис. 1, *б* и *в* представлены соответственно буртование и упаковка в мешки битумной суспензии и холодной асфальтобетонной смеси с диспергированным битумом типа Б2.



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

Автомобильные дороги в ходе эксплуатации непрерывно подвергаются воздействию различных факторов, которые постоянно меняются. В этом заключается главное их отличие от объектов, работающих в постоянных условиях и со стабильными свойствами. Любая дорога – сложная система с переменными фазовыми состояниями и уникальными характеристиками. В традиционном подходе проектирования автомобильных дорог принято рассматривать дорогу в виде комплекса отдельных элементов, обладающих различными свойствами и объединенных в единую систему, которая должна обеспечить требуемую долговечность и транспортно-эксплуатационные показатели в условиях непрерывно происходящих изменений. Если рассмотреть отдельный участок дороги и особенности его взаимодействия с окружающей средой в течение годового цикла работы, то в процессе его службы отдельные конструктивные элементы будут непрерывно испытывать воздействие переменных температур, влажности, транспортных нагрузок и других факторов в различных фазовых состояниях.

Данное обстоятельство сформировало требование к разработке дорожно-строительных материалов, которые должны применяться в этих условиях. Обратимся к техническому регламенту Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) Согласно п. 14.2. «Производство, транспортирование, хранение и применение дорожно-строительных материалов и изделий», надежность их работы в различных конструктивных элементах автомобильной дороги и инженерных сооружений на ней должна обеспечиваться «в течение жизненного цикла под воздействием транспортных нагрузок, климатических и иных факторов в условиях, исключающих следующие последствия:

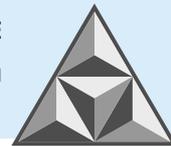
- а) разрушение автомобильной дороги или сооружений, или их участков (частей);
- б) необратимые деформации дорожных конструкций;
- в) недопустимое снижение основных транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги или сооружений на ней». Пункт 14.3. устанавливает, что дорожно-строительные материалы и изделия в течение всего срока службы автомобильной дороги и дорожных сооружений на них должны быть устойчивы к воздействию транспортных, природных и иных факторов».

А в п. 14.4 указано:

«физико-механические свойства дорожно-строительных материалов должны обеспечивать расчетную устойчивость конструктивных элементов автомобильной дороги при совместном воздействии транспортной нагрузки и природных факторов».

Отметим, что в п. 14.3 содержится требование устойчивости дорожно-строительных материалов и изделий в течение всего срока службы автомобильной дороги. Такое требование, вероятно, является избыточным. В формате установившейся практики обычно применяют критерий гарантийного срока для результатов выполненных работ.

Проверка соответствия по пункту 14.3 ТР ТС 014/2011 приводит к необходимости применения ст. 238 УК РФ «Производство, хранение, перевозка либо сбыт товаров и продукции, выполнение работ или оказание услуг, не отвечающих требованиям безопасности». Согласно этой статье, неправомерная выдача или использование официального документа, удостоверяющего соответствие указанных товаров, работ или услуг требованиям безопасности, наказываются штрафом в размере до 300 тыс. руб. или в размере заработной платы, или иного дохода осужденного за период до двух лет, либо обязательными работами на



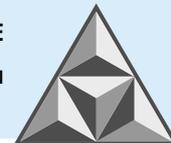
срок до 360 ч, либо ограничением свободы на срок до двух лет, либо принудительными работами на срок до двух лет, либо лишением свободы на тот же срок.

С учетом результатов исследований, созданные полуфабрикаты и переделы длительного хранения открывают возможности для развития нового класса материалов с большим сроком службы и обеспечения функциональной и деформационной устойчивости. При этом они не подпадают под действие п. 14.3 ТР ТС 014/2011, что, соответственно, исключает возможность применения ст. 238 УК РФ.

В чем же заключается преимущество переделов и полуфабрикатов материалов для дорожного строительства, по сравнению с традиционными? Переделы и полуфабрикаты призваны улучшить качество дорожных одежд. Применение инновационных композиционных материалов открывает перспективы для повышения показателей покрытий дорожных конструкций и увеличения срока безотказной их работы. Достижение этих целей становится возможным благодаря внедрению технологий ускоренного восстановления поверхностных слоев и упрощению процедур конструирования новых составов. При использовании ресурсосберегающих подходов, включающих местные и повторно переработанные компоненты, появляется возможность расширить временные рамки строительно-монтажных работ. Однако внедрение таких решений на практике сталкивается с рядом трудностей. Прежде всего, требуется заранее определить целевые функции и технико-функциональные характеристики разрабатываемого материала, а также установить соответствующие производственные процессы. Кроме того, необходимо проведение комплексного исследования закономерностей функционирования дорожного материала с учетом специфики составляющих компонентов и их влияния друг на друга.

Проектирование подобных материалов предполагает применение комплексного подхода, при котором концептуальное обоснование неразрывно связывается с их эксплуатационными параметрами и возможностью адаптации свойств под конкретные условия. Следует отметить, что технологические полуфабрикаты и композиционные переделы давно зарекомендовали себя в авиационной, машиностроительной и химической промышленности. Накопленный в этих секторах экономики практический опыт разработки, производства и применения переделов может быть адаптирован и использован для создания дорожно-строительных композиционных систем, особенно в контексте оптимизации технологий и повышения их гибкости. Передел, как процесс переработки или трансформации, имеет несколько достоинств. Во-первых, он позволяет получить более ценные продукты из исходного сырья, что положительно влияет на прибыль и конкурентоспособность. Во-вторых, в переделах могут быть успешно использованы вторичные ресурсы, что позволит вовлечь значительные объемы отходов и снизить нагрузку на окружающую среду. В-третьих, переделы способствуют решению проблемы получения продуктов с новыми свойствами. Они позволяют проектировать изменение поведения материала (в том числе – во времени) или сырья, из которого этот материал изготовлен, таким образом, чтобы получить продукт, отличающийся от исходного по нескольким требуемым параметрам. В-четвертых, переделы могут кардинальным образом улучшить качество выпускаемой строительной продукции.

В соответствии с обозначенными критериями представляется рациональным ввести новый термин «триггерные материалы» для обозначения композиций, имеющих не менее двух фазовых состояний устойчивого равновесия и способных переходить из одного состояния в другое при воздействиях бинарного характера (триггера).



Таким образом, проведенные исследования позволили сформировать направления будущих перспективных исследований в части получения строительных полуфабрикатов:

- разработка методов использования местного сырья и отходов промышленности в производстве композиционных полуфабрикатов;
- разработка методов испытаний полуфабрикатов в виде гранулированных переделов;
- разработка рецептур композиционных полуфабрикатов на основе гранулированных переделов под конкретные условия эксплуатации;
- совершенствование технологии производства композиционных полуфабрикатов в виде гранулированных переделов для получения и устройства дорожных покрытий;
- совершенствование технологии уплотнения полуфабрикатов в виде гранулированных переделов с формированием требуемого каркаса;
- определение температурных режимов укладки полуфабрикатов в виде гранулированных переделов в различном сочетании.

ВЫВОДЫ

1. Предлагается введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов – полуфабрикатов и технологических переделов. Также предлагается использовать новый технический термин – «триггерные материалы». Такие материалы имеют два и более фазовых состояния устойчивого равновесия и способны переходить из одного состояния в другое при воздействиях бинарного характера (триггера).

2. Разработаны и апробированы рецептуры гранулированных переделов с включением вторичных материалов, рекомендуемые к использованию в качестве ремонтных смесей, отличительной особенностью которых является возможность длительного хранения и укладки в холодном состоянии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Игнатьев А.А.** Функционально устойчивые дорожные гранулированные смеси (переделы) длительного хранения: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 2.1.8. Москва, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18.
2. **Ignatyev A.A.** Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024. Vol. 110. No. 11002. DOI: 10.4123/CUBS.110.2.
3. **Ignatiev A.A., Gotovtsev V.M., Gerasimov D.V., Razgovorov P.B.** The modeling of interfacial contacts in composites using the sitting drop-solid body system as an example // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 869. P. 400-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400.
4. **Ignatyev Aleksey A., Razgovorov Pavel B., Nagornov Roman S., Politaeva Natalya A, Mukhametova Liliya R., Pyashenko Svetlana B.** Composite Aluminosilicate Materials for Sorption Extraction of Impurity Substances of Vegetable Oils // *Resources*. 2022. Vol. 11. No. 9. DOI: 10.3390/resources11020009.
5. **Ignatiev A., Gerasimov D., Golikov I., Gotovtsev V.** Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste // *MATEC Web of Conferences : мат. конф. (Москва, 14–16 ноября 2018)*. Moscow: EDP Sciences, 2018. Vol. 251. № 01028. DOI: 10.1051/mateconf/201825101028.
6. **Ignatiev A.A., Gotovtsev V.M., Slepnev P.A.** Cold pelletized asphalt concrete mixture from reclaimed asphalt // *E3S Web Conferences*. 2023. Vol. 457.
7. Пат. 2701007 РФ. Способ получения гранулированного асфальтовяжущего на основе фосфогипса / **А.А. Игнатьев**; опубл. 24.09.2019, бюл. № 27.
8. **Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Ильин А.А.** Основы физико-химической механики экструдированных катализаторов и сорбентов. М.: КРАСАНД, 2012. 314 с.
9. **Тадмор З., Гогос К.** Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1984. 632 с.



10. **Ребиндер П.А.** Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч. 2. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 469 с.
11. **Румянцев А.Н., Наненков А.А., Ломов А.А., Готовцев В.М., Сухов В.Д.** Структурированный асфальтобетон – новое дорожное покрытие // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: мат. конф.* Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т, 2013. С. 23-25.
12. **Al-Mulla J., Makky S.** Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // *Zashchita Materiala*. 2017. Vol. 58. No. 3. P. 394-399.
13. **Khan I.M., Kabir S, Alhussain M.A., Almansoor F.F.** Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // *Proc. Eng.* 2016. Vol. 145. P. 1557-1564.
14. **Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A.** Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // *Waste Management & Research*. 2005. Vol. 23. No. 4. P. 322-327.
15. **Modarres A., Hamed H.** Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 259-267.
16. **Leng Z. Padhan R.K., Sreeram A.** Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 180. P. 682-688.
17. **Худякова Т.С., Масюк А.Ф., Калинин В.Н.** Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами // *Дорожная техника и технологии*. 2003. № 4. С. 174-181.
18. **Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Голиков И.В.** Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // *Дороги и мосты*. 2018. № 40. С. 304-315.
19. **Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A.** The effect of structuring composite building materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666. No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012079.
20. **Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С.** Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-26. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (дата обращения: 17.11.2025).
21. **Кочетков А.В., Леонтьев В.Ю.** Применение вяжущего материала на основе полиуретана для укрепления и ремонта защитных покрытий транспортных сооружений // *Транспортное строительство*. 2016. № 1. С. 7-10.
22. Пат. 2662493 РФ. *Битумная эмульсия и способ ее получения* / А.В. Кочетков; опубл. 26.07.2018, бюл. № 21.
23. **Кочетков А.В.** Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // *Транспортные сооружения*. 2018. № 4. DOI 10.15862/15SATS418 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (дата обращения: 17.11.2025).
24. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф. [и др.].** Битумная суспензия: под ред. Ю.Э. Васильева, Н.Е. Кокодовой. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2019. 192 с.

Поступила в редакцию 15.01.2026

Одобрена после рецензирования 13.02.2026

Принята к опубликованию 06.03.2026

REFERENCES

1. **Ignatyev, A.A.** Functionally stable road granulated mixtures (redesigns) for long-term storage: Abstract of D. Sc. dissertation: specialty 2.1.8. Moscow, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18 (in Russian).
2. **Ignatyev, A.A.** (2024), Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction, *Construction of Unique Buildings and Structures*, vol. 110, no. 11002. DOI 10.4123/CUBS.110.2.
3. **Ignatiev, A.A., Gotovtsev, V.M., Gerasimov, D.V. and Razgovorov, P.B.** (2020), The modeling of interfacial contacts in composites using the sitting drop-solid body system as an example, *Key Engineering Materials*, vol. 869, pp. 400-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400.
4. **Ignatyev, Aleksey A., Razgovorov, Pavel B., Nagornov, Roman S., Politaeva, Natalya A, Mukhametova, Liliya R. and Pyashenko, Svetlana B.** (2022), Composite Aluminosilicate Materials for Sorption Extraction of Impurity Substances of Vegetable Oils, *Resources*, vol. 11, no. 9. DOI: 10.3390/resources11020009.



5. **Ignatyev, A. Gerasimov, D., Golikov, I. and Gotovtsev, V.** (2018), Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste, *MATEC Web of Conferences: conf. proc. (November 14–16, 2018)*, Moscow: EDP Sciences, vol. 251, no. 01028. DOI: 10.1051/mateconf/201825101028.
6. **Ignatyev, A.A., Gotovtsev, V.M. and Slepnev, P.A.** (2023), Cold pelletized asphalt concrete mixture from reclaimed asphalt, *E3S Web Conferences*, vol. 457.
7. Pat. 2701007 Russian Federation. *Method for producing granulated asphalt binder based on phosphogypsum / A.A Ignatyev*; publ. 24.09.2019, Bull. 27 (in Russian).
8. **Prokofiev, V.Yu., Razgovorov, P.B. and Ilyin, A.A.** (2012), Fundamentals of physico-chemical mechanics of extruded catalysts and sorbents. Moscow: KRASAND, 314 p. (in Russian).
9. **Tadmor, Z. and Gogos, K.** (1984), Theoretical foundations of polymer processing. Moscow: Chemistry, 632 p. (in Russian).
10. **Rebinder, P.A.** (1979), Selected works. Surface phenomena in disperse systems. Pt. 2. Physico-chemical mechanics. Moscow: Nauka, 469 p. (in Russian).
11. **Rumyantsev, A.N., Nanenkov, A.A., Lomov, A.A., Gotovtsev, V.M. and Sukhov, V.D.** (2013), Structured asphalt concrete – a new road surface, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: mat. konf. [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: conference proceedings]*, Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering Univer., pp. 23-25 (in Russian).
12. **Al-Mulla, J. and Makky, S.** (2017), Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier, *Zashchita Materiala*, vol. 58, no. 3, pp. 394-399.
13. **Khan, I.M. Kabir, S, Alhussain, M.A. and Almansoor, F.F.** (2016), Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction, *Proc. Eng.*, vol. 145, pp. 1557-1564.
14. **Hassani, A., Ganjidoust, H. and Maghanaki, A.A.** (2005), Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management & Research*, vol. 23, no. 4, pp. 322-327.
15. **Modarres, A. and Hamed, H.** (2014), Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET), *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 259-267.
16. **Leng, Z., Padhan, R.K. and Sreeram, A.** (2018), Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt, *J. Clean. Prod.*, vol. 180, pp. 682-688.
17. **Khudyakova, T.S., Masyuk, A.F. and Kalinin, V.N.** (2003), Features of the structure and properties of bitumens modified with polymers, *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii [Road Technology and Equipment]*, no. 4, pp. 174-181 (in Russian).
18. **Gerasimov, D.V., Ignatyev, A.A. Gotovtsev, V.M. and Golikov, I.V.** (2018), Prospects for the use of phosphogypsum in asphalt concrete production, *Roads and Bridges*, no. 40, pp. 304-315 (in Russian).
19. **Gotovtsev, V.M. and Ignat'yev, A.A.** (2019), The effect of structuring composite building materials, *IOP Conference Ser.: Mat. Sci. Eng.*, vol. 666, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012079 (in Russian).
20. **Razgovorov, P.B., Ignatyev, A.A., Abramov, M.A. and Nagornov, R.S.** (2020), Processing of aluminosilicate raw materials and metro construction dumps into composite sorbents for cleaning water and oil-containing media, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 1, no. 1, pp. 10-26. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (accessed: 17.11.2025) (in Russian).
21. **Kochetkov, A.V. and Leontiev, V.Yu** (2016), Application of polyurethane-based binder for strengthening and repairing protective coatings of transport structures, *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, no. 1, pp. 7-10 (in Russian)
22. Pat. 2662493 Russian Federation. *Bitumen emulsion and method of its production / A.V. Kochetkov*; publ. 26.07.2018, Bull. 21 (in Russian).
23. **Kochetkov, A.V.** (2018), Bitumen suspension on solid emulsifier, *Transport Structures*, no. 4. DOI: 10.15862/15SATS418. Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (accessed: 17.11.2025) (in Russian).
24. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu. and Ivanov, A.F. [et al.]** (2019), Bitumen suspension: monograph; ed. By Yu.E. Vasiliev, N.E. Kokodeeva. Saratov: Saratov State Technical Univer. 192 p. (in Russian)

Received 15.01.2026

Approved 13.02.2026

Accepted 06.03.2026