

На правах рукописи



Игнатьев Алексей Александрович

**ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВЫЕ ДОРОЖНЫЕ
ГРАНУЛИРОВАННЫЕ СМЕСИ (ПЕРЕДЕЛЫ) ДЛИТЕЛЬНОГО
ХРАНЕНИЯ**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва

2024

Работа выполнена в федеральном автономном учреждении «Российский дорожный научно-исследовательский институт»

Научный консультант **Ватин Николай Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Васильев Юрий Эммануилович**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные материалы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», г. Москва

Овчинников Игорь Георгиевич
доктор технических наук, профессор, профессор базовой кафедры АО «Мостострой-11» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Бондарев Борис Александрович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительного материаловедения и дорожных технологий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва

Защита состоится «04» апреля 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан .02.2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.04,
к.т.н., доцент

Радаев А. Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Высокий темп автомобилизации, повышение транспортных нагрузок в последние годы предъявляют повышенные требования к материалам, используемым при строительстве дорожных покрытий автомобильных дорог и мостовых сооружений, к технологиям и методам ремонта, а также к требованиям для последующей эксплуатации этих сооружений. Новые требования также затрагивают условия выполнения работ по устройству покрытий. Потребность в новых материалах и конструктивных решениях для дорожных одежд, а также в новых методах расчета конструкций, учитывающих реальное поведение материалов при различных температурно-влажностных условиях, транспортных нагрузках и фазовых состояниях, создают предпосылки для разработки новых материалов, в том числе в виде полуфабрикатов, включая технологии их производства, которые бы обеспечивали длительное хранение без потери эксплуатационных качеств, функциональные особенности эксплуатации, круглогодичный строительный сезон, широкое использование местного и вторичного сырья, повышение качества устройства и срока эксплуатации дорожных покрытий.

Решение обозначенной проблемы позволит улучшить качество устройства дорожных одежд, продлить срок их эксплуатации, в том числе за счет оперативного ремонта покрытия, продления строительного сезона, а также получения ценных переделов (полуфабрикатов) из местного и вторичного сырья. В настоящее время успешному продвижению и внедрению таких материалов препятствует целый ряд ограничений. Так, необходимо учитывать функционал получаемого материала, разработать соответствующую технологию производства, изучить механизмы поведения материала, с учетом особенностей применяемых компонентов. Получение переделов требует применения системного подхода к их проектированию для объединения создаваемой концепции материала (передела) с его эксплуатационными характеристиками и перспективой проектирования свойств под заданные условия эксплуатации. Положительный опыт получения переделов в передовых отраслях промышленности может быть успешно внедрен и в отрасли дорожного хозяйства при проектировании дорожных композиционных материалов.

Работа выполнялась в рамках реализации задач, обозначенных в утвержденной Правительством Российской Федерации «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года».

Научная проблема

Научная проблема, на решение которой направлено представленное диссертационное исследование, заключается в недостатке теоретических и экспериментальных знаний о методах получения технологических переделов (полуфабрикатов) композиционных материалов для ремонта и содержания асфальтобетонных покрытий. Существующий уровень научных знаний не обеспечивает выполнение возросших требований к качеству дорожных работ, функциональную и сегрегационную устойчивость материала, универсальность по

возможности производства из них требуемой номенклатуры асфальтобетонных смесей, расширения строительного сезона, оперативность применения, несслеживаемость, возможность длительного хранения, применения местного и вторичного сырья.

Степень разработанности темы

При проведении анализа научно-технической литературы, патентных данных и нормативно-технической документации были изучены способы повышения эксплуатационных показателей асфальтобетонов и смесей. Большой вклад в развитие теории асфальтобетонов внесли отечественные и зарубежные ученые. В ходе исследований отмечено, что к настоящему времени основные векторы развития асфальтобетонов идут по пяти направлениям. Направление, связанное с введением добавок, способных при применении микроволнового воздействия обеспечить самозалечивание микротрещин покрытия, – новое направление, которое активно развивается в настоящее время. Направление, которое можно отнести к понятию «умных» материалов, где вводимые добавки обеспечивают возможность для асфальтобетонного покрытия использовать технологии, широко распространенные для интеллектуальных транспортных систем, за счет электропроводимости смеси; направление продиктовано цифровой трансформацией многих отраслей промышленности. Направление, связанное с поиском вариантов замены основного вяжущего (битума) на другие виды вяжущих или оценка возможности применения комбинаций вяжущих, как цемент и битум одновременно; в этом направлении поисковые работы ведутся с момента широкого внедрения асфальтобетонов на дорогах. Направление, связанное с оценкой вводимых добавок непосредственно в саму асфальтобетонную смесь в виде различных волокон как природного происхождения, так и искусственно полученных; исследования в данном направлении появились относительно недавно и связаны с необходимостью повышения несущей способности дорожных одежд. Направление, связанное с поиском альтернативных материалов, отходов производства или вторичных ресурсов в качестве полной или частичной замены традиционных компонентов асфальтобетонной смеси; при этом решаются сразу две задачи: обеспечение экологичности и снижение стоимости приготовления асфальтобетонной смеси; данное направление получило широкое распространение во многих странах мира. Результаты исследований, посвященные модификации вяжущих, также ограничиваются в основном локальным решением таких задач, как, например, придание битуму более упругих свойств за счет введения резиновой крошки от отработанных шин. В основном поиски направлены на улучшение свойств вяжущего и расширения температурных диапазонов работы по сравнению с исходными характеристиками битума. Однако, вопросы разработки эффективных материалов для дорожного строительства, способных значительно расширить диапазон температурной работы от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, в целом не изучались, поскольку добиться таких результатов крайне сложно при традиционных подходах получения материалов для покрытия, поэтому требуется поиск перспективных технологий и материалов, к которым относится направление, связанное с разработкой функционально устойчивых переделов длительного хранения.

Цель, задачи работы

Цель работы – разработка научно-технических основ получения новых функционально устойчивых гранулированных смесей (переделов) длительного хранения на основе местных и вторичных ресурсов для ремонта и содержания автомобильных дорог.

В соответствии с целью работы определены следующие задачи:

1. Обоснование эффективности и целесообразности применения технологии гранулирования окатыванием для получения дорожных гранулированных смесей (переделов).

2. Разработка математической модели межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», основанной на аппарате механики сплошной среды, описывающей процессы формирования структуры гранулированных композитов.

3. Исследование структуры и свойств вторичных дисперсных материалов (отходов) и технологических условий получения гранулированных смесей (переделов).

4. Изучение структуры и характеристик готовых гранулированных смесей (переделов) с использованием современных методов анализа.

5. Разработка рецептур и технологических параметров приготовления гранулированных смесей на основе вторичных отходов промышленности (фосфогипс, солесодержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона) с оценкой их функциональности.

6. Исследование технологических особенностей формирования упорядоченного каркаса гранулированных смесей (переделов) в дорожном полотне под воздействием уплотняющей нагрузки.

7. Обобщение результатов исследования и оценка перспективности дальнейших исследований в области развития и совершенствования функционально устойчивых дорожных композиционных материалов.

Объектом исследования является гранулированные смеси (переделы) длительного хранения для устройства дорожных покрытий.

Предметом исследования является механизмы структурообразования и характеристики гранулированных переделов длительного хранения с включением вторичных материалов.

Научная новизна работы

Экспериментально и теоретически обосновано применение технологического приема гранулирования окатыванием для получения новых гранулированных смесей для дорожного строительства, включающих вторичные материалы (фосфогипс, солесодержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона). Получен патент на изобретение.

Разработана технология получения гранулированных смесей (переделов), отличающаяся от традиционной технологии приготовления асфальтобетонных смесей возможностью получения отдельных гранул с формированием структуры (упорядоченного расположения) из мелкодисперсных частиц внутри гранулы, достижением минимальной пористости, минимального расхода вяжущего и надежным капсулированием изучаемых вторичных материалов.

Впервые разработана математическая модель межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», отличительной особенностью которой является независимость от «физического существа» сил, формирующих взаимодействие фаз, при учете эффектов структурирования мелкодисперсных частиц в композите.

Разработана схема формирования расклинивающего давления в узкой щели между поверхностями твердых частиц дисперсной системы, позволившая впервые получить аналитическое выражение для определения значения расклинивающего давления.

По результатам теоретических исследований впервые установлено, что перекрытие межфазных слоев в зазоре между твердыми поверхностями не приводит к изменению характера смачивания в зоне контакта фаз, но сопровождается формированием ядра межфазного слоя в центральной зоне зазора с постоянными значениями межфазных напряжений.

Разработаны и апробированы рецептуры гранулированных переделов, включающие фосфогипс, соледержащие и гипсосодержащие отходы и гранулят старого асфальтобетона, отличительной особенностью которых является обеспечение возможности длительного хранения продуктов приготовления.

Впервые установлено, что уплотнение гранулированной смеси целесообразно проводить в диапазоне температур от 20 °С до 120 °С, обеспечивающем достижение повышенных показателей по прочности и водостойкости (коэффициент водостойкости не менее 0,85). При этом наилучшие результаты наблюдаются при температуре уплотнения гранулированной смеси от 80 °С до 100 °С, что позволяет снизить температуру уплотнения на 40 °С. Получен патент на изобретение.

Описан механизм формирования каркаса композиционного материала, полученного в результате воздействия уплотняющей нагрузки, отличительной особенностью которого является деформируемость оболочек каждой отдельной сферической гранулы (передела), состоящей из минерального порошка и вяжущего. При этом каждая гранула, соприкасаясь с поверхностями соседних гранул, деформируется и преобразуется из сферической формы в «многогранную». Этот эффект позволяет достичь упорядоченной структуры композита с максимальной плотностью упаковки и минимальной пористостью.

Теоретическая и практическая значимость работы

Впервые разработана модель межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», не зависящая от «физического существа» сил, формирующих взаимодействие фаз. В межфазной области действуют силы и эффекты различной физической природы, что предполагает использование разных подходов для их описания. В разработанной модели характер действующих сил не имеет значения – важен факт их наличия. Это позволяет сократить количество экспериментальных параметров, необходимых для реализации модели, и получить результаты, пригодные для дальнейшего практического использования.

Разработанная технология гранулирования окатыванием позволяет получить гранулированные смеси (переделы) длительного хранения и достичь упорядоченного расположения мелкодисперсной фракции без пор и пустот для

всех исследуемых вторичных материалов. При этом гранулы представляют собой готовый технологический передел (полуфабрикат).

Доказана возможность использования фосфогипса, соледержащих и гипсосодержащих отходов, гранулята старого асфальтобетона в качестве вторичных материалов для приготовления гранулированной смеси.

Разработаны рецептуры смесей, включающие фосфогипс, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона.

Разработана технология модификации битума вторичным полиэтилентерефталатом (15 % от массы битума), отличительной особенностью которой является возможность достижения требуемой водостойкости готового композита за счет равномерного распределения частиц полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в объеме битума. При этом частицы ПЭТФ являются силовыми центрами, создающими дополнительное внутреннее давление в системе, препятствующее проникновению жидкости в само вяжущее и в готовую гранулу.

Внедрены и прошли апробацию на реальных объектах автомобильных дорог гранулированные смеси (переделы) на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов (фосфогипс, ПЭТФ, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона) с получением актов наблюдений, испытаний и мониторинга. Результаты испытаний признаны положительными.

Установлено, что комбинирование отдельных гранул, полученных из разных материалов и сформованных в единую систему путем уплотнения, открывает новые возможности для изучения и проектирования новых функционально устойчивых композиционных материалов с характеристиками и свойствами ранее не изученными и востребованными в настоящее время и на перспективу.

Получено 2 патента на изобретение.

За разработку гранулированной смеси автор награжден почетным званием «Инженер Года» (г. Москва), а также награжден премией имени Гришманова И.А. в области науки, техники и организации производства промышленности строительных материалов, конструкций и строительной индустрии (г. Москва).

Результаты исследований используются в учебном процессе, отражены в монографии.

Работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, пункты: 13. Разработка, организация производства и технология изготовления эффективных материалов, изделий и конструкций для транспортного строительства; 14. Разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств; 22. Методы и способы утилизации строительных конструкций и сооружений после выработки ими ресурса или выполнения целевых задач, предотвращающие засорение окружающей среды.

Методология и методы исследования

При проведении теоретических и экспериментальных исследований автором применялся системный подход. Методологической и теоретической основой исследования являются разработки отечественных и зарубежных ученых в области транспортного строительства с применением методов математического моделирования и обработки результатов эксперимента. Результаты экспериментальных исследований получены и использованием стандартных методик. При исследовании состава вторичных материалов и получаемой гранулированной смеси применялись методологические основы системно-структурного подхода строительного материаловедения «состав-структура-свойство». Исследования проводились с применением современных методов анализа: термогравиметрического метода анализа, рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии, химического анализа. Для анализа образцов на прочность при сжатии использовался пресс с испытанием при разных температурах, при испытании на водонасыщение и водостойкость использовалась вакуумная установка.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автором сформулирована цель и задачи исследования, выбраны объект и предмет исследования, лично разработана программа и проведены экспериментальные и теоретические исследования, лично принято участие в апробации результатов исследования на реальных объектах автомобильных дорог, лично разработаны рецептуры смесей, сформулированы задачи и направления будущих исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа и оценка эффективности применения технологии гранулирования окатыванием с обоснованием целесообразности получения дорожных гранулированных смесей (переделов) для ремонта и содержания автомобильных дорог.

2. Математическая модель межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», описывающая процесс структурообразования дисперсных систем, основанная на принципах механики сплошной среды для несжимаемой жидкости.

3. Результаты экспериментальных исследований, посвященные изучению структуры и свойств вторичных дисперсных материалов (отходов) с оценкой и обоснованием технологических особенностей получения гранулированных смесей (переделов).

4. Методологические принципы и анализ физико-химических основ получения гранулированных смесей (переделов) из вторичного сырья (фосфогипс, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона).

5. Рецептуры и технологические параметры приготовления гранулированных смесей (переделов) на основе вторичных материалов промышленности (фосфогипс, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона) с оценкой их функциональности.

6. Результаты исследований по технологическим особенностям формирования упорядоченного каркаса гранулированных смесей (переделов) при воздействии уплотняющей нагрузки.

7. Оценка результатов апробации гранулированной смеси (передела) в качестве ремонтного материала на дорожных объектах.

8. Результаты анализа особенностей получения универсальных композиционных материалов с возможностью производства из них требуемой номенклатуры асфальтобетонных смесей, расширения строительного сезона, оперативности применения, включая перспективы развития и направления дальнейших исследований.

Степень достоверности научных результатов работы

Высокая степень достоверности полученных научных результатов обеспечивается использованием системного подхода к решению поставленных задач и применения поверенного оборудования, современных методов исследований, статистической обработки и необходимых повторных испытаний, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов с вероятностью 0,95, а также обсуждением результатов исследований на международных и всероссийских конференциях и их положительной апробацией, в том числе апробацией на реальных объектах автомобильных дорог.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: всероссийская научно-практическая конференция «Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения» (г. Казань, 2008), 61-я, 63-я, 64-я, 67-я, 68-я, 69-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов (г. Ярославль, 2008, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016), VI международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование» (г. Санкт-Петербург, 2017), «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering» (г. Москва, 2018, г. Красноярск, 2021, г. Смоленск, 2021, г. Барнаул, 2021), VI международная научная конференция «Integration, partnership and innovation in construction science and education» (IPICSE–2018) (г. Москва, 2018, г. Санкт-Петербург, 2019), XVI международная научно-практическая конференция «New polymer composite materials» (г. Нальчик, 2020), II международная научно-практическая конференция «Materials Science, Engineering and Energy: Problems and Prospects of Development» (г. Барнаул, 2020), II международная конференция «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (ICMSIT–II–2021) (г. Красноярск, 2021), интенсивный курс «Advances in materials sciences – 2021» в рамках II международной конференции «Современные достижения в области материаловедения и технологий» SAMSTech–II–2021 (г. Красноярск, 2022), международная конференция «Органические вяжущие и асфальтобетонные смеси в дорожном строительстве» (г. Москва, 2022), VI всероссийская научно-практическая конференция специалистов строительного комплекса (г. Сочи, 2022), 81-я международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ (г. Москва, 2023), международная научно-практическая конференция «Цифровой инжиниринг в строительстве».

Самовосстанавливающиеся конструкционные материалы. Защищенные и модульные сооружения» (г. Санкт-Петербург, 2023).

Внедрение результатов

Апробация результатов экспериментальных исследований была проведена компаниями ОАО «Ярдормост» (г. Ярославль), АО «Мостотрестсервис», филиал «Петровское» (рабочий поселок «Петровское», Ярославская область), Агентство по муниципальным заказам (г. Ярославль) на отдельных участках дороги М8 «Холмогоры», автомобильных дорогах Ярославской области и улиц города Ярославля в качестве ремонтных смесей. Результаты диссертационных исследований внедрены в АО «Мостотрестсервис», филиал «Петровское» (рабочий поселок «Петровское», Ярославская область) как холодные ремонтные смеси для покрытий автомобильных дорог.

Публикации

Основные результаты и положения диссертационных исследований представлены в 50 публикациях, в том числе 1 монографии, 15 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science, Scopus и входящих в перечень, рекомендованный ВАК (в том числе 6 статей, опубликованных в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК), а также 2 патентах на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений, содержит 369 страниц основного текста, 76 таблиц и 129 рисунков, 12 приложений.

Содержание работы

Во введении диссертационной работы обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, обоснована ее теоретическая и практическая значимость.

В главе 1 представлены результаты критического анализа современного состояния и направления совершенствования дорожно-строительных композиционных материалов, который показал, что исследования направлены не только на поиск новых материалов, улучшающих физико-механические характеристики асфальтобетонной смеси, но и на поиск различных добавок, которые могли бы изменить механику работы покрытия, продлить срок службы, расширить температурные диапазоны работы и обеспечить требуемые характеристики покрытию.

Глобальные вызовы устанавливают новые требования к материалам, и существующие материалы уже не способны эффективно работать в изменяющихся текущих условиях, а, если говорить о перспективах, то в текущем состоянии необходимо искать новые альтернативные технологии приготовления смесей, которые бы обеспечили эффективность работы покрытий на годы вперед и обеспечили новый народно-хозяйственный эффект для нашей страны.

В главе 2 рассматриваются особенности применения технологии гранулирования окатыванием для получения дорожного композиционного

материала (передела). Гранулирование – процесс агломерации, при котором аморфная масса мелкодисперсных частиц преобразуется в гранулу (сферическую частицу) при наличии влаги, добавляемой в процессе обработки.

Как показывают проведенные исследования, при гранулировании могут проявляться как физико-механические, так и физико-химические связи между отдельными частичками.

Опираясь на особенности формирования гранул и оценивая перспективы использования технологии гранулирования окатыванием для получения дорожных композиционных материалов, было принято решение об использовании промышленно выпускаемого гранулятора (рисунок 1) с техническими характеристиками, представленными в таблице 1, и проведении испытаний для последующего изучения характеристик готовой продукции (передела).



Рисунок 1 – Гранулятор тарельчатого типа

Таблица 1 – Технические характеристики гранулятора

Параметр	Значение
Диаметр барабана	1200 мм
Диаметр загрузочного отверстия	600 мм
Глубина барабана	450 мм
Максимальная загрузка барабана	120 кг
Частота вращения барабана	20...40 об/мин
Угол наклона оси барабана к горизонту	90... – 45 °

В развитие данного утверждения можно предположить, что определяющим фактором повышения прочности композиционных материалов является толщина прослоек связующего между частицами применяемого порошка. Определить значение этой величины можно исходя из простых соображений. Зная процентное содержание связующего в асфальтовяжущем и удельную поверхность минерального порошка, можно рассчитать толщину прослойки битума. Возьмем в качестве примера минеральный порошок МП-1 и битум. Удельная поверхность минерального порошка МП-1 по паспортным данным составляет 250-450 м²/кг, что позволяет найти его поверхность в единице объема асфальтовяжущего вещества. Проведенный расчет показал, что толщина прослойки связующего между частицами порошка составляет порядка 10⁻⁷ м. Сказанное позволяет отнести прослойки связующего в асфальтовяжущем веществе к разряду нанообъектов и объяснить эффект кардинального увеличения прочности материала.

При неупорядоченном расположении минеральных частиц в материале прочность связей между ними определяется прочностью матрицы композиционного материала, которая при заданном соотношении компонентов асфальтобетона не всегда образует непрерывную фазу. В рассматриваемом материале матрицу системы составляют оболочки асфальтовяжущего на крупных частицах наполнителя, которые при окатывании образуют упорядоченную

структуру на каждой частице минеральной части. В результате этого прочность связей между частицами материала возрастает и становится выше прочности связующего материала, что гарантирует общее повышение прочности композита.

В главе 3 приведены результаты разработки математической модели для описания физических процессов, протекающих на границе раздела взаимодействующих фаз «жидкое–твердое» с использованием аппарата механики сплошной среды.

В настоящее время в цикл исследователей включен не один десяток различного рода поверхностных сил, которыми описывается межфазное взаимодействие. По мнению В.И. Ролдугина, мы сейчас сталкиваемся с ситуацией, подобной имевшей место в физике в начале двадцатого века, когда для каждого явления вводились свои «собственные» силы. Однако силы, проявляющиеся на молекулярном уровне, имеют фактически одну природу и являются производными от электромагнитных сил, действующих между электронами и ядрами.

Исходя из этого, была поставлена задача о разработке общего метода моделирования перечисленных выше взаимодействий. В монографии Б.В. Дерягина указывается способ реализации такого подхода, состоящий «в замене кулоновских и молекулярных (дисперсионных) сил системой натяжений. Возможность такой замены не зависит от физического существования этих сил, так как базируется на формальной эквивалентности электромагнитных сил системе натяжений». В соответствии с изложенным, в рамках проводимых исследований был разработан новый подход, позволяющий реализовать сформулированное предложение. Реализация данного подхода является научной новизной исследований.

Замена молекулярных сил системой натяжений предполагает использование аппарата механики сплошной среды для моделирования поверхностных явлений с разработкой тензора межфазных напряжений, удовлетворяющего условиям равновесия межфазного слоя, пригодного для любых видов межфазных взаимодействий.

В качестве исходного положения для решения поставленной задачи воспользуемся известной формулой Баккера для определения поверхностного натяжения межфазного слоя

$$\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} [p - p_{\tau}(z)] dz, \quad (1)$$

где p – давление среды в межфазном слое, $p_{\tau}(z)$ – компонента тензора, действующая в плоскости межфазного слоя, z – координата нормальная к поверхности слоя. Записанная формула широко используется при описании поверхностных явлений, но параметры, входящие в нее, требуют уточнения. В частности, одни авторы могут трактовать давление p как гидростатическое давление – другие как внутреннее давление жидкости. Физическая сторона зависимости $p_{\tau}(z)$ не раскрывается – указывается лишь сложный ее характер с наличием промежуточного экстремума.

В объемной фазе жидкости межмолекулярное взаимодействие осуществляется дальнедействующими силами притяжения, которые

уравновешиваются силами молекулярного отталкивания с формированием уравновешенного изотропного поля сил давления. Распределение давлений в такой системе определяется внешними воздействиями и описывается уравнениями гидростатики. В тонких межфазных слоях вследствие контактного взаимодействия разнородных фаз возникает межмолекулярное силовое поле, приводящее к нарушению равновесия в макроскопическом представлении. В результате образуется новая переходная структура (межфазный слой), в тензоре напряжений которой появляются составляющие, отличные от компонент изотропного давления, присутствующие в формуле Баккера как $p_t(z)$.

Отсюда следует, что напряжения $p_t(z)$, формирующие поверхностное натяжение, определяются особенностями межмолекулярных взаимодействий, в связи с чем давление p в формуле Баккера имеет смысл рассматривать как внутреннее давление среды. Значение внутреннего давления для большинства жидкостей измеряется, как правило, тысячами атмосфер, а в твердых телах определяет прочностные характеристики материалов. Однако внешние проявления поверхностных эффектов сводятся к капиллярным явлениям, измеряемым миллиметрами водяного столба, что, на первый взгляд, находится в противоречии со значениями внутренних давлений. Противоречие снимается с учетом того, что поверхностное натяжение определяется интегрированием компонент тензора напряжений по толщине межфазного слоя, размеры которого сопоставимыми с молекулярными.

Формирование межфазного слоя «жидкость–твердое» осуществляется в жидкой фазе со слабой сжимаемостью, что определило использование модели несжимаемой жидкости. Деформация среды в межфазном слое происходит практически без изменения объема – изменение линейного размера вдоль какой-либо координатной оси компенсируется соответствующим сжатием вдоль других осей, происходящим без совершения работы. В связи с этим в изотермическом процессе значение удельной внутренней энергии жидкости в межфазном слое равно значению в объемной фазе.

Наличие компоненты $p_t(z)$ тензора межфазных напряжений в формуле Баккера свидетельствует о том, что тензор напряжений в межфазном слое является анизотропным, т.е. содержит компоненты, отличные от составляющих давления. В соответствии с этим целесообразно представить тензор напряжений совокупностью шаровой части с компонентами давления и девиатора напряжений. При этом шаровая часть тензора обусловлена внутренними молекулярными свойствами жидкости, а компоненты девиатора напряжений отражают воздействие твердой фазы на жидкость.

Для формирования тензора межфазных напряжений введем декартову систему координат с осями Ox и Oy , расположенными в плоскости межфазного слоя, и осью Oz , перпендикулярной плоскости. Тогда, в соответствии с уравнениями механики сплошной среды, компоненты тензора давления могут быть определены из соотношения

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}, \quad (2)$$

а составляющие девиатора напряжений должны удовлетворять требованию

$$\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz} = 0. \quad (3)$$

В результате тензор межфазных напряжений запишется в виде

$$\sigma_{xx} = P + \sigma'_{xx}; \quad \sigma_{yy} = P + \sigma'_{yy}; \quad \sigma_{zz} = P + \sigma'_{zz}. \quad (4)$$

Шаровая часть тензора P определяет изменение объема среды, который в условиях модели несжимаемой жидкости остается неизменным. Девиатор напряжений отвечает за деформацию выделенного объема среды в межфазном слое, вызванную воздействием твердой поверхности. Объемная фаза жидкости, контактирующая с межфазным слоем, находится в равновесном состоянии, в котором дальнедействующие силы молекулярного притяжения, формирующие изотропное поле давлений жидкости P_0 , уравниваются силами молекулярного отталкивания. Уравновешенное силовое поле, в соответствии с принципами механики, не оказывает воздействия на граничащие с ним объекты, то есть контакт объемной жидкой фазы с межфазным слоем сведется к граничным условиям

$$P = P_0; \quad \frac{dP}{dz} = 0, \quad (5)$$

определяемым изотропностью и постоянством давления P_0 в объемной фазе.

Для равновесия межфазного слоя необходимо выполнение условия постоянства значения составляющей тензора σ_{zz} по толщине межфазного слоя в выражениях (2)–(4), сводящегося к требованию $\frac{d\sigma_{zz}}{dz} = 0$. Представим процесс образования межфазного слоя как внешнее силовое воздействие твердой фазы на изотропное поле внутреннего давления жидкости P_0 , эффект от которого с учетом ограниченного радиуса действия молекулярных сил будет тем сильнее, чем ближе расположена точка межфазного слоя к твердой поверхности. В результате возникает дополнительное давление ΔP_e , переменное по толщине межфазного слоя, которое в дальнейшем будем называть межфазным давлением. Значение ΔP_e максимально на твердой поверхности и равно нулю на границе с объемной фазой жидкости. Таким образом, внутреннее давление в произвольной точке межфазного слоя будет представлено как $P = P_0 + \Delta P_e$, а нормальная компонента тензора межфазных напряжений запишется в виде

$$\sigma_{zz} = P_0 + \Delta P_e + \sigma'_{zz}. \quad (6)$$

Внутреннее давление P_0 определяется молекулярными свойствами жидкости, что позволяет при использовании модели несжимаемой жидкости считать этот параметр постоянным, не зависящим от внешних силовых воздействий. Это позволяет исключить его из уравнений равновесия, а требование $\sigma_{zz} = \text{const}$ в соответствии с (4) сведется к соотношениям:

$$\sigma'_{zz} = -\Delta P_e; \quad \sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \frac{\Delta P_e}{2}, \quad (7)$$

где равенство компонент σ'_{xx} и σ'_{yy} определяется симметрией тензора напряжений по отношению к оси Z . С учетом изложенного и выражений (2)–(4) компоненты тензора межфазных напряжений запишутся в виде:

$$\sigma_{zz} = 0; \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{3 \cdot \Delta P_e}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, контактное взаимодействие жидкой и твердой фаз сводится к напряжениям, действующим в плоскости межфазного слоя, формирующим поверхностное натяжение.

Характер взаимодействия жидкой и твердой фаз определяется адгезионными свойствами контакта, сводящимися к притяжению или отталкиванию жидкости к твердой поверхности посредством межмолекулярных сил, радиус действия которых ограничен. Значение этого параметра для заданной жидкости определяется ее внутренними свойствами, не зависящими от характера адгезионного взаимодействия. В отличие от этого, силовое воздействие твердой фазы на жидкость определяется адгезионными свойствами контакта, которые, как правило, имеют радиус действия, отличный от дальнего действия молекулярных сил жидкости.

Контактное взаимодействие фаз принято определять значением краевого угла смачивания θ_0 , образуемого сидячей каплей жидкости на твердой поверхности, которое может изменяться в интервале $\pi \geq \theta_0 \geq 0$. При $\theta_0 = 0$ в условиях абсолютного смачивания твердой поверхности жидкостью взаимное притяжение фаз максимально, а толщина межфазного слоя δ равна значению радиуса дальнего действия сил межмолекулярного притяжения жидкости R . Межфазное давление ΔP_e , определяющее взаимное притяжение контактирующих фаз, достигает максимума P_0 на твердой стенке. С учетом того, что ΔP_e определяет в соответствии с (6) избыточное по отношению к P_0 давление, значение давления на стенке составит $2 \cdot P_0$. Поверхностные натяжения межфазных слоев «жидкость–твердое» γ_{ls} и «жидкость–газ» γ_{lg} в рассматриваемом случае будут равны по модулю и противоположны по направлению.

Далее используем правило знаков напряжений в выражениях (7)–(8), принятое в теории Ван-дер-Ваальса, где положительными считаются сжимающие напряжения. Для рассмотренного случая $\theta_0 = 0$ твердая поверхность в результате притяжения жидкости формирует в межфазном слое положительные сжимающие напряжения $\Delta P_e > 0$ в соответствии с выбранным правилом знаков, а девиаторная компонента тензора σ'_{zz} в выражении (7) должна быть противоположного знака, т.е. действовать на растяжение межфазного слоя. В соответствии со свойством девиатора напряжений (3) компоненты тензора σ'_{xx} и σ'_{yy} работают на сжатие среды. Таким образом, воздействие тензора (8) на жидкость межфазного слоя приводит к деформации шарового объема среды в эллипсоид, вытянутый по оси Z и сжатый по двум другим координатным осям.

Рассмотренный случай абсолютного смачивания имеет скорее теоретическое, чем прикладное значение. Переходя в сферу практически реализуемых значений θ_0 , отметим, что увеличение краевого угла смачивания означает ослабление взаимного притяжения фаз, приводящее к снижению значения ΔP_e в зависимостях для компонент тензора. Толщина межфазного слоя при этом уменьшается, а при $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ взаимное притяжение фаз прекращается, т.е. значение межфазного давления ΔP_e становится равным нулю. Внутреннее давление жидкости на твердой стенке становится равным давлению P_0 в

объемной фазе жидкости, в связи с чем необходимость формирования переходной зоны от жидкости к твердому пропадает, и образования межфазного слоя не происходит, т.е. $\delta = 0$.

Дальнейшее увеличение значения краевого угла смачивания в область $\theta_0 > \frac{\pi}{2}$ определяет изменение направления взаимодействия фаз от притяжения к отталкиванию. Тогда в выражениях (8) знаки напряжений изменятся на противоположные, т.е. нормальные напряжения в плоскости межфазного слоя σ_{xx} и σ_{yy} будут напряжениями растяжения так же, как в межфазном слое «жидкость–газ». При $\theta_0 = \pi$ воздействие твердой фазы на жидкость прекращается, а межфазный слой «жидкость–твердое» вырождается в точку.

На рисунке 2 показана трансформация межфазного слоя «жидкость–твердое» с увеличением значения краевого угла смачивания. Через P_δ на рисунке обозначено давление жидкости на границе с твердой поверхностью.

Приведенные в (8) выражения компонент тензора межфазных напряжений содержат только девятаторные компоненты и выражаются через межфазное давление ΔP_e , приводящее к деформации среды в межфазном слое. Для значений краевого угла смачивания $\frac{\pi}{2} > \theta_0 > 0$ деформация среды сводится к удлинению вдоль оси Z и сжатию вдоль осей X и Y . В процессе удлинения происходит увеличение межмолекулярных расстояний в жидкой фазе межфазного слоя, приводящее к снижению молекулярного давления на величину ΔP_i . На границе межфазного слоя с объемной фазой $\Delta P_i = 0$, а $P = P_0$ с дальнейшим убыванием по мере приближения к твердой поверхности.

На рисунке 2,а показаны распределения давлений ΔP_e и ΔP_i по толщине межфазного слоя, откуда видно, что эти давления имеют противоположные знаки, уравновешивают друг друга, т.е. $\Delta P_e = -\Delta P_i$. Таким образом, внешнее воздействие твердой поверхности на жидкость ΔP_e компенсируется силовым полем молекулярного притяжения ΔP_i жидкости, формируя уравновешенную систему сил. Зависимость $\Delta P_e(z)$, показанная на рисунке 2,а, определяет максимально возможное значение толщины межфазного слоя δ_{\max} , равное радиусу дальнего действия молекул жидкости R . Для значений $\theta_0 > 0$ распределение межфазного давления $\Delta P_e(z)$ реализуется в области, составляющей только часть интервала $R \geq z \geq 0$, уменьшающейся с возрастанием значения θ_0 .

Тензор межфазных напряжений (8) обеспечивает выполнение условия $\sigma_{zz} = \text{const}$, но не гарантирует равновесия системы в связи с переменным значением ΔP_e по толщине слоя. Зависимость $\Delta P_e(z)$, как показано выше, должна соответствовать закону распределения молекулярных сил жидкости в зависимости от расстояния $\Delta P_i(z)$, откуда следует, что компоненты тензора (8) определяют необходимые, но недостаточные условия равновесия межфазного слоя. Специфика взаимодействия фаз определяется наличием мощного градиента межфазного давления в межфазном слое, приводящего к формированию объемных сил.

Введем в рассмотрение объемную силу F_V , которая в механике сплошной среды определяется как отношение силы ΔF , приложенной к малому элементу среды, к массе этого элемента Δm и выражается зависимостью

$$F_V = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dz}, \quad (9)$$

где ρ – плотность среды. Направление объемной силы совпадает с направлением вектора градиента давления. Так, для схемы на рисунке 2,а объемная сила направлена из объемной фазы жидкости к твердой поверхности, создавая на стенке реакцию обратного направления, равную N_s , обеспечивающую равновесие межфазного слоя. Значение этой реакции во многом определяет характер зависимости $\Delta P_e(z)$. Далее индексы «e» и «i» в обозначении давлений будем опускать, т.к. в условиях равновесия соответствующие давления при одинаковых значениях отличаются только знаками, т.е. $\Delta P_e = -\Delta P_i$.

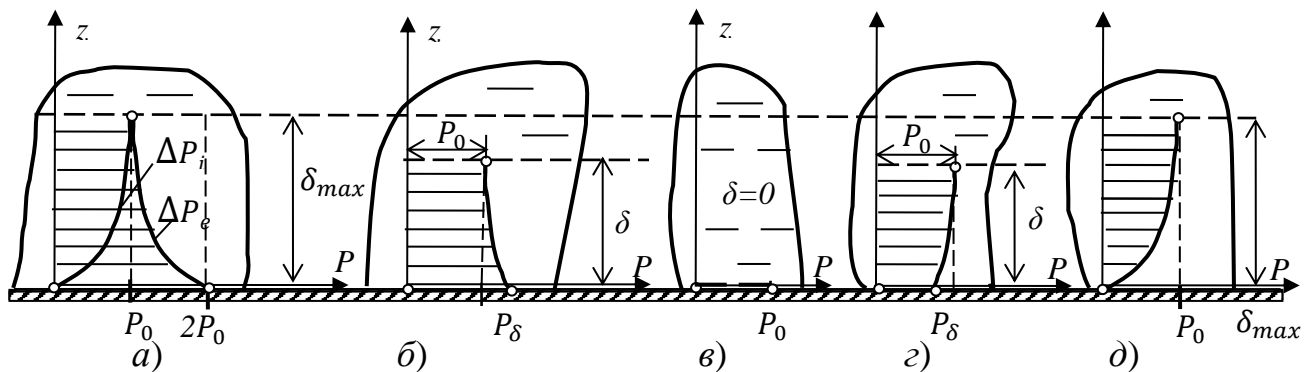


Рисунок 2 – Трансформация межфазного слоя «жидкость–твердое» с увеличением значения краевого угла смачивания: $\theta_0 = 0$ (а); $\frac{\pi}{2} > \theta_0 > 0$ (б); $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ (в); $\pi > \theta_0 > \frac{\pi}{2}$ (г); $\theta_0 = \pi$ (д)

Особенность межфазного слоя состоит в том, что закон распределения давления по толщине слоя является нелинейным. При линейном распределении давления, например, гидростатического, значение градиента давления постоянно в любой точке, а реакция твердой поверхности равна давлению жидкости в точке контакта. В межфазном слое градиент давления не может быть постоянным по толщине слоя, исходя из того, что его значение в зоне контакта с объемной фазой равно нулю, достигая максимума на твердой поверхности. Это приводит к появлению разницы между давлением жидкости на твердой поверхности и ее реакцией N_s на межфазный слой.

На твердой поверхности молекулы находятся в фиксированном положении, а формирование тензора напряжений в соответствии с выражениями (8) обусловлено деформацией объема жидкой среды, включающей изменение линейных размеров по каждой из трех координатных осей. В твердом теле такая деформация невозможна, а воздействие твердой фазы на жидкость сводится к напряжению N_s , нормальному к твердой поверхности. Значение N_s находится из уравнения (2) при условии $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0$ и составляет $3 \cdot \Delta P_\delta$, где ΔP_δ межфазное давление жидкости на твердой поверхности. Таким образом, реакция твердой поверхности на жидкость будет равна

$$N_s = 3 \cdot \Delta P_\delta, \quad (10)$$

т.е. в три раза превышать межфазное давление жидкости в области контакта фаз.

Выделим элемент межфазного слоя в форме параллелепипеда, одно из ребер которого равно толщине межфазного слоя δ , а два других формируют грань площадью S . Запишем уравнение равновесия элемента в проекции на ось Z с учетом объемной силы (9)

$$N_s \cdot S = F_V \cdot \Delta m = F_V \cdot \rho \cdot S \cdot \delta, \quad (11)$$

откуда из (8) и (9) получим

$$\frac{d\Delta P}{dz} \cdot \delta = 3 \cdot \Delta P_\delta. \quad (12)$$

Для заданной жидкости значение параметра δ определяется условиями смачивания, т.е. свойствами контакта взаимодействующих фаз, и может принимать значения в интервале $R \geq \delta \geq 0$. Это позволяет рассматривать δ как независимую переменную z , а ΔP_δ как текущее значение давления ΔP в точке межфазного слоя. Таким образом, уравнение (11) преобразуется в уравнение с разделяющимися переменными $\frac{d\Delta P}{\Delta P} = 3 \cdot \frac{dz}{z}$ с решением $\Delta P = C(z)^3$, где C – константа интегрирования, которая может быть определена из граничного условия на твердой стенке при абсолютном смачивании жидкостью твердой поверхности в соответствии с рисунком 2,а.

Для записи граничных условий выберем начало отсчета координаты z . Как видно из схем на рисунке 2, граничные условия в точках контакта межфазного слоя с объемной фазой жидкости не зависят от условий смачивания, в связи с чем целесообразно поместить начало отсчета оси Z на границе межфазного слоя с объемной фазой. Тогда для случая абсолютного смачивания граничные условия запишутся в виде: при $z = R$ $\Delta P = P_0$ (рисунок 2,а), с решением дифференциального уравнения

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^3. \quad (13)$$

Как указывалось ранее, полученная зависимость $\Delta P_i(z)$ определяется внутренними свойствами жидкой фазы в интервале $R \geq z \geq 0$, т.е. охватывает все возможные варианты смачивания твердых тел данной жидкостью.

Уравнение (13) содержит два экспериментальных параметра: P_0 – внутреннее давление жидкости и R – радиус дальнего действия молекул жидкости. Внутреннее давление определяется экспериментально исследованием сжимаемости жидкости и по данным разных литературных источников составляет для воды от 10000 до 15000 атмосфер. Что касается значения второго параметра R , то его значения в известной литературе приводятся только на уровне оценок, которые могут существенно отличаться друг от друга.

Проведенное исследование позволило обоснованно определить теоретическое значение поверхностного натяжения межфазного слоя «жидкость–твердое» для $\theta_0 = 0$ с использованием компонент тензора (6) и уравнения Баккера. При этом толщина межфазного слоя «жидкость–твердое» может быть определена по формуле:

$$\delta = R \cdot (\cos(\theta_0))^{0,25}. \quad (14)$$

В проведенном исследовании впервые удалось реализовать подход, состоящий в замене кулоновских и молекулярных (дисперсионных) сил системой натяжений.

Использование изложенного подхода позволило разработать модель межфазного слоя «жидкость–твердое», не зависящую от «физического существа» сил, формирующих взаимодействие фаз. В предлагаемом подходе характер действующих сил не имеет значения – важен факт их наличия. Это позволяет сократить количество экспериментальных параметров, необходимых для реализации модели, и получить результаты, пригодные для практического использования.

Таким образом, удалось реализовать принципиально новый подход к описанию поверхностных явлений, основанный на уравнениях равновесия механики сплошной среды, который позволил определить тензор межфазных напряжений в межфазном слое «жидкость–твердое» и объяснить механизм формирования расклинивающего давления, лежащий в основе эффекта структурирования дисперснонаполненных композиционных материалов.

В главе 4 представлены результаты исследования структуры и свойств вторичных материалов, используемых для приготовления гранулированного передела: фосфогипс, твердые солевые и гипсовые осадки от водоподготовки нефтехимических производств, гранулят старого асфальтобетона (асфальтовая крошка) и ПЭТФ.

Для детального изучения физико-химических свойств фосфогипса была исследована одна из пяти изучаемых марок фосфогипса, а именно – Марка Б неопудренная (полугидрат). Распределение частиц фосфогипса по фракциям осуществлялось с помощью прибора Analyzette-22 (Италия).

Дифрактограммы исходного и прокаленного фосфогипса АО «Апатит» (Балаковский филиал) снимались на аппарате ДРОН-3М, показания фиксировались с использованием эффективного угла $1 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$. Средний размер кристаллитов оценивался по формуле Селякова-Шеррера.

Выполнение термогравиметрического (ТГ) анализа и формирование данных дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) производились с использованием прибора TG 209 F1 Netzsch в потоке газообразного азота ($20 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$) в диапазоне температур $20\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ при скоростях нагрева 1 и $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ в течение $6,3$ и $0,8$ ч соответственно.

Микрофотографии образцов с включением материала фосфогипса были получены на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 SBH с приставкой для элементного анализа в точках на поверхности образца и установкой для нанесения углеродного покрытия при разрешающей способности в диапазоне $1\text{--}50 \text{ мкм}$ и напряжении $5,0 \text{ кВ}$.

Инфракрасные спектры образцов исходного фосфогипса АО «Апатит» и фосфогипса, обработанного при $900 \text{ }^\circ\text{C}$, снимались в виде таблеток с бромистым калием на приборе Avatar 360 FT-IR ESP в области $4000\text{--}400 \text{ см}^{-1}$. Расшифровка сигналов осуществлялась с использованием фундаментального труда А.Л. Смита.

Поскольку изучаемый материал в виде 5 образцов фосфогипса имеет разные свойства, каждая партия фосфогипса прошла предварительную подготовку с

целью определения требуемых режимов сушки, измельчения и температуры измельчения и введения фосфогипса в получаемый гранулированный передел.

Определяющим технологическим параметром процесса получения минерального порошка из фосфогипса, влияющим на дальнейшую технологию производства материала, является температура нагрева фосфогипса с целью доведения его до требуемого состояния по использованию. Был проведен эксперимент по динамике изменения влажности фосфогипса в зависимости от температуры. Установлено, что для получения минерального порошка из фосфогипса достаточно прокаливания исходного продукта до температуры 200 °С.

На рисунке 3 представлены микрофотографии фосфогипса прокаленного при разных температурах.

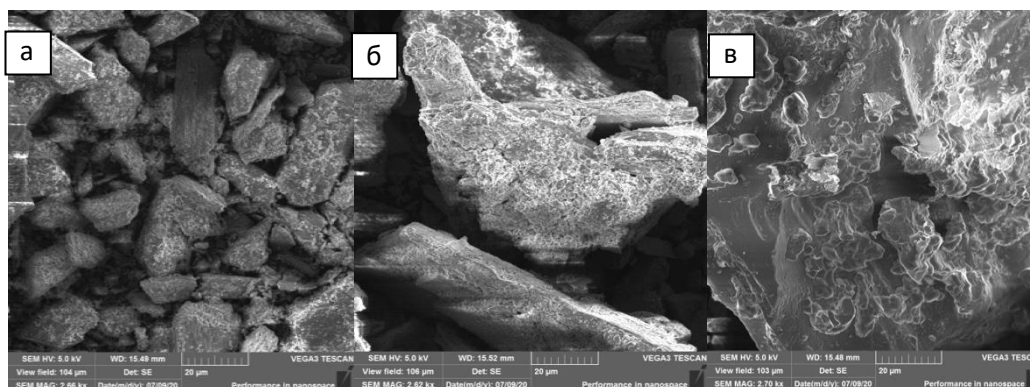


Рисунок 3 – Микрофотографии: а) – поверхность фосфогипса АО «Апатит» при нормальной температуре, 20 мкм; б) – поверхность фосфогипса при прокаливании до 150 °С, 20 мкм; в) – поверхность фосфогипса при прокаливании до 900 °С, 20 мкм

На основании представленных данных сделан вывод о том, что температура от 150 °С до 200 °С является подходящей для обработки исходного сырья и последующего введения его в состав композита для получения гранулированной смеси.

Технические характеристики фосфогипса марки Б отвечают требованиям ГОСТ 32761-2014 для МП-3, а по ряду показателей они схожи с традиционно применяемым доломитовым минеральным порошком МП-1, которые применяются при приготовлении асфальтобетонных смесей.

На основе результатов изучения характеристик базового фосфогипса было установлено, что при воздействии влаги он изменяет свое фазовое состояние и переходит из полуводного в двуводный фосфогипс, а при сушке наблюдается обратный процесс. С учетом указанного обстоятельства в рамках настоящего исследования была выдвинута гипотеза о том, что при введении вторичного ПЭТФ в битум в качестве модификатора и при одновременном применении технологии гранулирования окатыванием будет обеспечена требуемая водостойкость асфальтобетона, полученного на основе фосфогипса, при одновременном решении задачи экологии.

На первоначальном этапе оценивались физико-механические характеристики вторичного ПЭТФ и двух марок битума, традиционно применяемых в дорожном строительстве. В ходе исследований было установлено, что ПЭТФ не взаимодействует с битумом на химическом уровне ввиду отсутствия в битуме потенциально возможных растворителей ПЭТФ. Следовательно, без промежуточного химического растворения ПЭТФ последний не может быть химически растворен в битуме, даже при повышении температуры битумного вяжущего вплоть до критической – 230–250 °С. Однако, было установлено, что при такой температуре битум формирует вместе с ПЭТФ истинный раствор.

Влияние добавки вторичного ПЭТФ на свойства связующего оценивались значением краевого угла смачивания для капель битума с различным содержанием ПЭТФ. В качестве твердого тела в работе использовались предметные силикатные стекла, а роль системы играли образцы битума с различными концентрациями ПЭТФ: 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. Капли битума наносились на подложку и выдерживались при температуре 100 °С в течение 20 минут, после чего с помощью микроскопа производилось фотографирование капель и измерение краевого угла смачивания. Для исследований использовался битум марки БНД 60/90 (базовое вяжущее) На рисунке 4 показаны фотографии капель битума с различным содержанием ПЭТФ. Таким образом, увеличение содержания ПЭТФ в битуме приводит к увеличению значения краевого угла смачивания.

Для разрешения вопроса о конкретизации формы присутствия пластика в связующем (дисперсия или раствор) было проведено исследование образцов битума, ПЭТФ и модифицированного битума (добавка ПЭТФ 10 %) методом дифференциально-сканирующей калориметрии на приборе DSC 200 Phox ф. NETZSCH. Результаты представлены на рисунке 5.

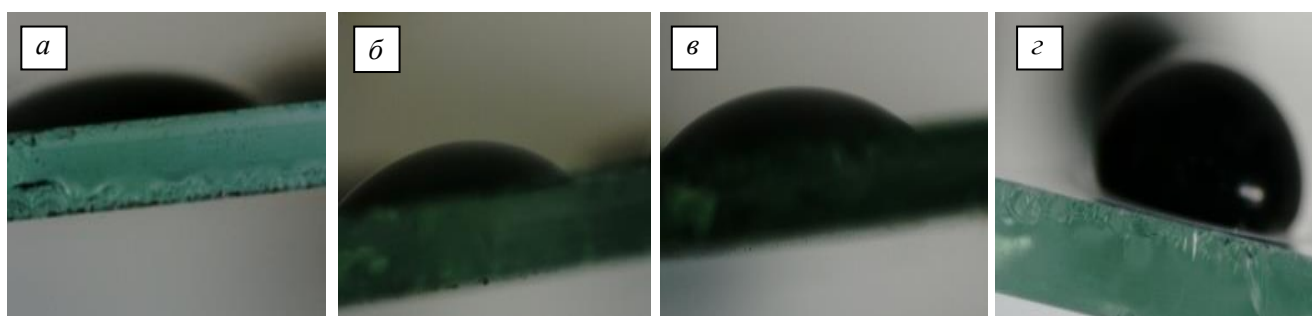


Рисунок 4 – Концентрация ПЭТФ в битуме: а) – 5 %; б) – 10 %; в) – 15 %; г) – 20 %

Анализ рисунка 5 позволяет сделать ряд важных выводов. Присутствие на кривой 3 характерных переходов, присущих исходным компонентам, указывает на отсутствие их качественного смешения. Образование истинного раствора не происходит; модификатор распределяется в битуме в виде дисперсии. Дисперсная фаза модификатора, распределенная в объеме битума, являет собой своеобразные силовые центры. Эти центры создают дополнительное внутреннее давление в системе, препятствующее проникновению жидкости в связующее.

Таким образом был установлен механизм воздействия ПЭТФ на битум, обеспечивающий повышение водостойкости асфальтобетона.

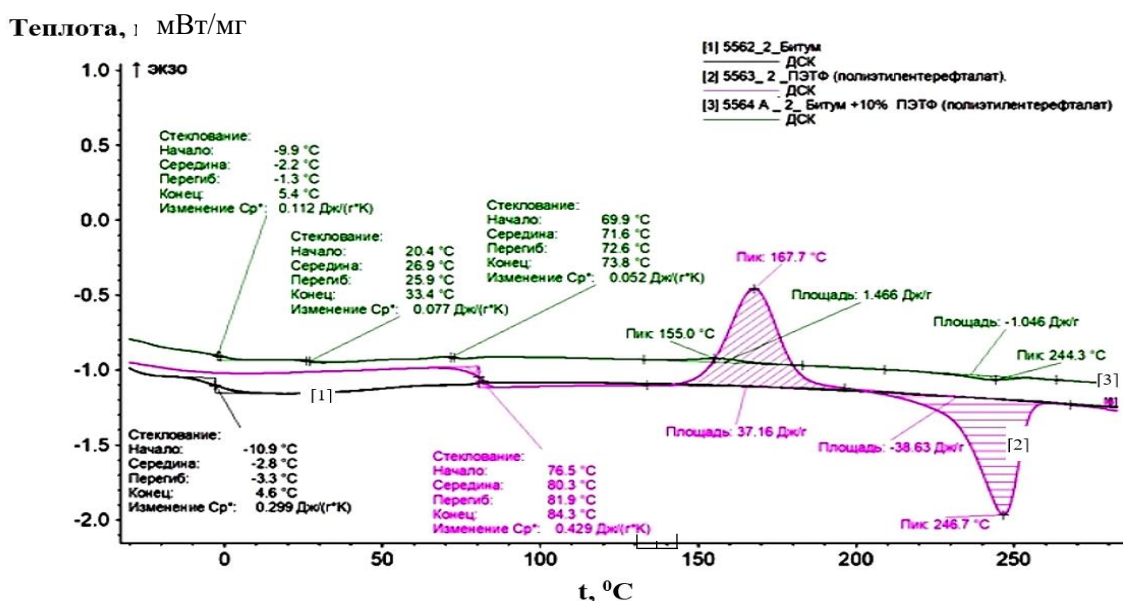


Рисунок 5 – Термограммы образцов битума БНД 60/90 (1), модификатора ПЭТФ (2) и системы битум – модификатор ПЭТФ (3)

Помимо фосфогипса и ПЭТФ, в рамках данного исследования были рассмотрены солесодержащие и гипсодержащие отходы, полученные в результате выпаривания сточных вод, образующихся в результате очистки промышленных стоков предприятий «ЗапСибНефтехим» и «Воронежнефтесинтезкаучук» и прошедшие процедуру последующего обжига при температуре $500\text{--}600^\circ\text{C}$. При этом гипсовый осадок содержит в большей степени нерастворимые соли и порядка 10 % растворимых солей. Влажность такого гипсового осадка может составлять до 55 % до сушки. Солевой осадок содержит в основном растворимые соли и порядка 20 % нерастворимых солей. Влажность солевого осадка может составлять до 15 % до сушки. Размер частиц менее 100 мкм.

Поскольку отобранные для исследования солесодержащие и гипсодержащие отходы схожи по характеристикам с традиционными минеральными порошками, данные материалы были взяты для подготовки гранулированной смеси с последующим детальным изучением характеристик готовой продукции.

На рисунке 6,а и 6,б представлена микрофотография поверхности частиц солесодержащих отходов. На рисунке 6,в и 6,г представлена микрофотография поверхности части гипсодержащих отходов.

В рамках данного исследования была выдвинута гипотеза о перспективности использования технологии гранулирования окатыванием применительно к грануляту старого асфальтобетона. С учетом требований по реализации задач замкнутого цикла работ для асфальтобетонного покрытия (рециклинг) была проведена комплексная оценка эффективности переработки старого асфальтобетона с использованием технологии гранулирования окатыванием.

Использование технологии гранулирования окатыванием применительно к грануляту старого асфальтобетона дает возможность получения принципиально нового дешевого материала, пригодного для создания полноценного

асфальтобетонного покрытия. Процесс окатывания состоит в обработке материала, помещенного во вращающийся разогретый барабан. При этом происходит упорядочение структуры композита с образованием пленок связующего между минеральными частицами минимальной толщины, обеспечивающими резкое повышение прочности сформированных гранул.

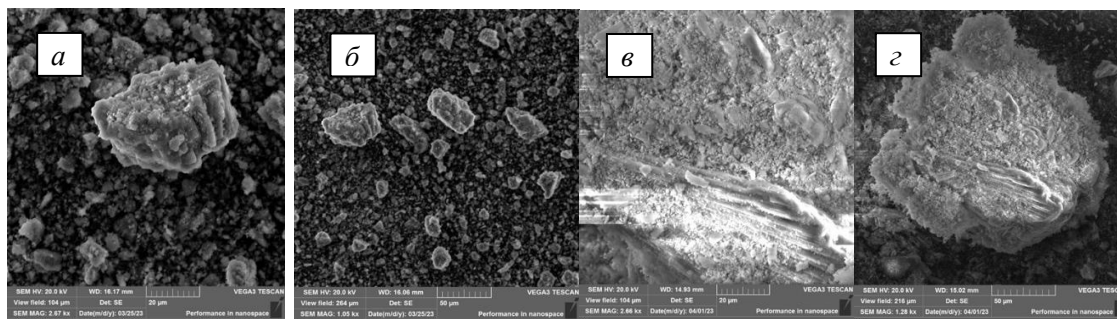


Рисунок 6 – Поверхность солевых осадков, 20 мкм (а); 50 мкм (б); поверхность гипсовых осадков, 20 мкм (в); 50 мкм (г)

В главе 5 представлены результаты исследования структуры и характеристик гранулированного материала для дорожного строительства на основе вторичных материалов. Проведенные исследования позволили оценить целесообразность получения качественно новых композиционных материалов для дорожного строительства с расширением их функциональности под конкретные условия эксплуатации. Создаваемая модель структуры композита в свете современных научных представлений базируется на получении готового композита, свойства которого в значительной мере обусловлены поверхностными или наноэффектами и теми материалами, из которых он изготовлен. Создание такой структуры вполне реально с использованием известного технологического приема – гранулирования окатыванием. На рисунке 1 показано фото гранулятора; на рисунке 7 – фото готовой смеси.



Рисунок 7 – Передел

С использованием технологического приема гранулирования были подготовлены гранулы, состоящие из фосфогипса марки Б, щебня «Габбро-диабаз» фракции 5 мм в качестве зародышей и битум марки БНД 60/90 модифицированный 15 % ПЭТФ. Отдельно были подготовлены гранулы с чистым битумом без модификации, но с аналогичными компонентами. Наибольший интерес представляет сравнение поверхностей чистого фосфогипса (рисунок 8,а) и гранулы из фосфогипса, включающей чистый битум (рисунок 8,б) и гранулы с битумом, модифицированным ПЭТФ (рисунок 8,в). Как видно из сравнения фотографий, на грануле с чистым битумом поверхность ровная без дополнительных вкраплений, в то время как на поверхности гранулы с модифицированным битумом ПЭТФ (15 %) отчетливо видны частицы полиэтилентерефталата с размерами от 1 мкм до 5 мкм, что согласуется с общим видом дисперсии ПЭТФ, полученной при охлаждении расплава в циклогексаноне. Данный эффект обеспечивает дополнительную

водостойкость материала и формирование гидрофобной поверхности за счет наличия вкраплений частиц ПЭТФ.

Дополнительно был изучен атомарный состав гранул. На поверхности гранулы (рисунок 9) с чистым не модифицированным битумом определяющую роль играют атомы кремния, углерода и незначительного количества кислорода, кальция, натрия, магния, фосфора и алюминия. Атомы фосфора и серы на поверхности практически не наблюдаются, что говорит о капсулировании частиц фосфогипса.

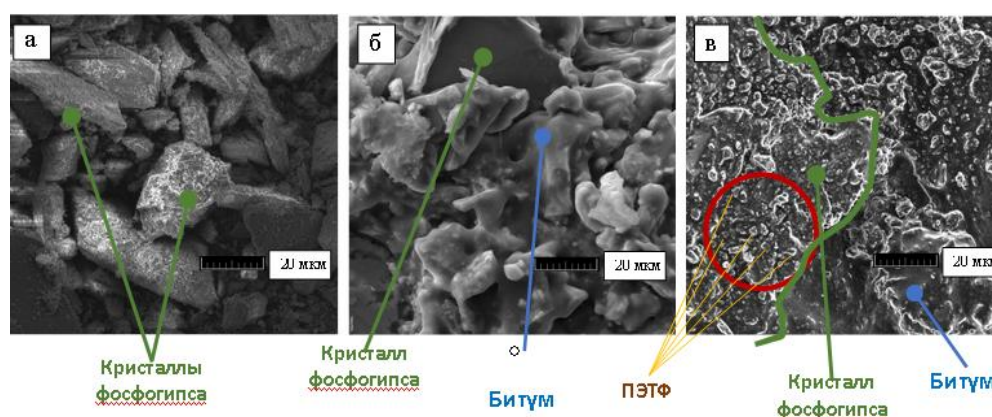


Рисунок 8 – Сравнение поверхностей чистого фосфогипса марки Б (а), композиции фосфогипс и битум (б), композиции фосфогипс и битум модифицированный ПЭТФ 15 % (в)

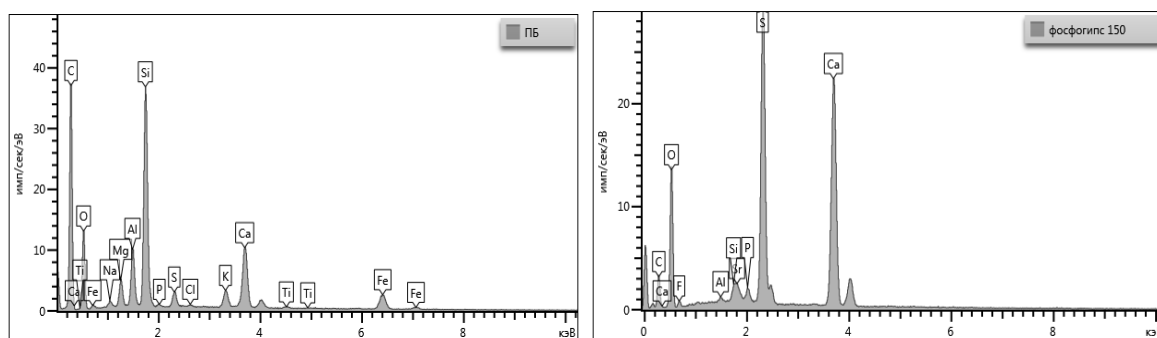


Рисунок 9 – Атомарный состав: а) – внешней поверхности гранулы с фосфогипсом марки Б и немодифицированным битумом (внутри гранулы щебень габбро-диабаз); б) – поверхности фосфогипса марки Б

Для сопоставления с полученными результатами на рисунке 9,б представлен атомарный состав фосфогипса марки Б, прокаленного при температуре 150 °С. Как видно из графика, определяющую роль играют атомы кальция, серы и кислорода (в составе гидратированных сульфатов кальция), с включением примесного фтора, что дополнительно подтверждает эффективность технологии гранулирования, которая обеспечивает капсулирование фосфогипса и надежное покрытие поверхности гранулы. Данное обстоятельство позволяет расширить область применения различных видов вторичных ресурсов и отходов в данном материале.

Аналогичные исследования были проведены для гранул на основе солесодержащих и гипсодержащих отходов. В рамках анализа поверхности

данных гранул (рисунок 10) были найдены частицы ПЭТФ (аналогично гранулам на фосфогипсе). Поверхность равномерная, все частицы укрыты битумом.

Для формирования полноценной картины влияния технологии гранулирования окатыванием на свойства готовой продукции в качестве отдельного направления исследований был отобран гранулят старого асфальтобетона (асфальтовая крошка) и исследован по аналогичной схеме с фосфогипсом, соле- и гипсосодержащими отходами.

На первом этапе из гранулята старого асфальтобетона была получена гранулированная смесь с использованием применяемой технологии гранулирования окатыванием. Определялся гранулометрический состав с использованием сит с ячейками квадратного сечения и прочность образцов на сжатие (рисунок 11).

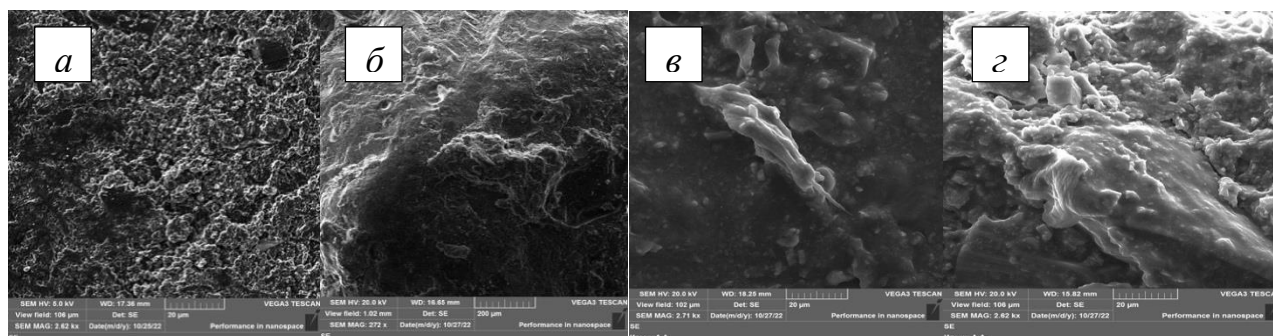


Рисунок 10 – Микрофотографии поверхности гранул: а) – внешняя поверхность гранулы на основе гипсосодержащих отходов с битумом модифицированным ПЭТФ 15% (20 мкм); б) – внутренняя поверхность гранулы на основе гипсосодержащих отходов с битумом модифицированным ПЭТФ 15% (20 мкм); в) – внешняя поверхность гранулы на основе гипсосодержащих отходов с битумом без модификации (20 мкм); г) – внутренняя поверхность гранулы на основе гипсосодержащих отходов с битумом без модификации (20 мкм)

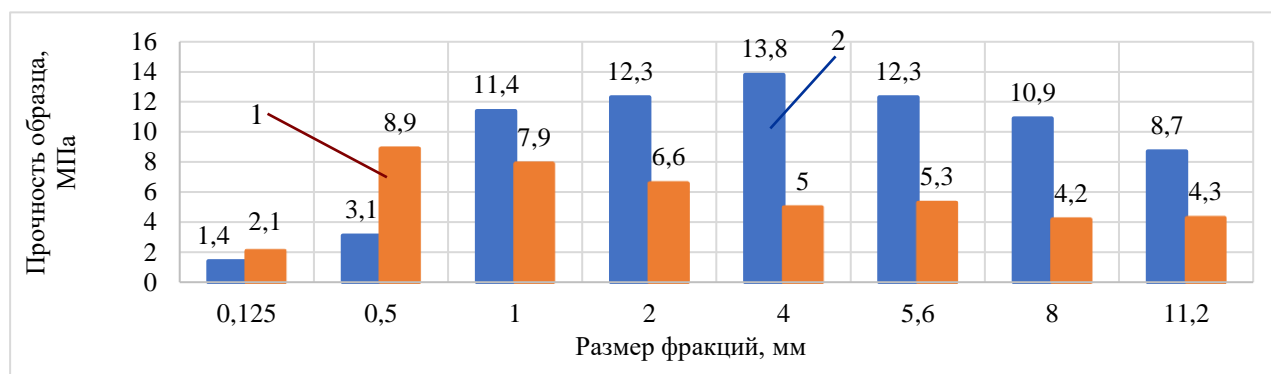


Рисунок 11 – Прочность на сжатие при 20 °С: 1) – неокатанный материал; 2) – окатанный материал

Внешняя поверхность гранул ровная, без характерных выступов, а внутренняя поверхность гранулы равномерная, без пустот, что позволяет обеспечить надежную упаковку частиц, а также эффективную последующую эксплуатацию покрытия. При сравнении окатанной и неокатанной крошки (рисунок 12) видно, что гранулят (крошка) старого асфальтобетона имеет рваную

угловатую поверхность и очень грубую текстуру поверхности с хаотичным расположением частиц, а также наличием характерных пор.

При сравнении окатанной (рисунок 12) и неокатанной крошки (рисунок 13) видно, что гранулят (крошка) старого асфальтобетона имеет рваную угловатую поверхность и грубую текстуру поверхности с хаотичным расположением частиц, а также наличием характерных пор.

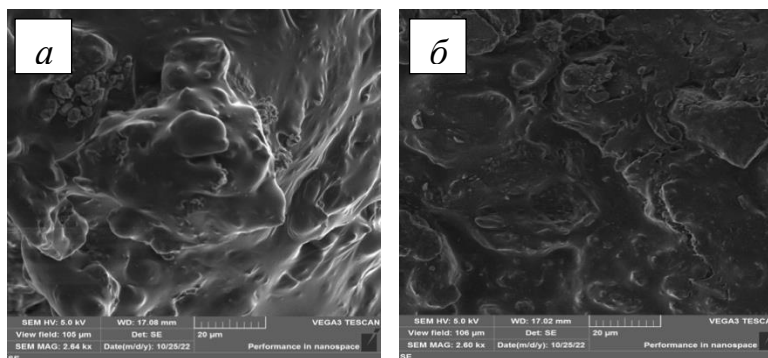


Рисунок 12 – Микрофотографии: *а*) – внутренняя поверхность гранулы из гранулированной асфальтовой крошки (20 мкм); *б*) – внешняя поверхность гранулы из гранулированной асфальтовой крошки (20 мкм)

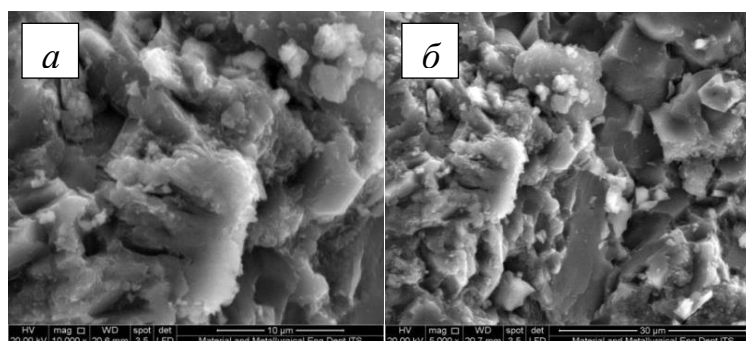


Рисунок 13 – Микрофотография гранулята старого асфальтобетона: *а*) – внешняя поверхность (10 мкм); *б*) – внешняя поверхность (30 мкм)

В главе 6 исследовались технологические режимы получения гранулированных композиционных материалов на основе изучаемых промышленных отходов.

Проведенные исследования позволили определить технологические параметры процессов модификации битума полиэтилентерефталатом и получения минерального порошка из фосфогипса, исходя из физико-химических соображений. Разработка технологии получения гранулированного материала связана с определением большого количества режимных параметров технологического процесса гранулирования окатыванием, состава асфальтобетонной смеси, температурных параметров и т.д. В настоящей главе представлены результаты исследований по этому направлению.

График зависимости предела прочности образцов от температуры гранулирования изображен на рисунке 14,*а*; график зависимости водонасыщения образцов от температуры гранулирования – на рисунке 14,*б*.

Наилучшие результаты по контролируемым характеристикам показала смесь, гранулирование которой проводилось при температуре 150 °С. Наилучшие

результаты получены при процентном содержании модифицированного вяжущего (битум и ПЭТФ) от 6 % и выше. Увеличение процентного содержания модифицированного вяжущего более 7 % не приводит к заметному увеличению прочности образцов.

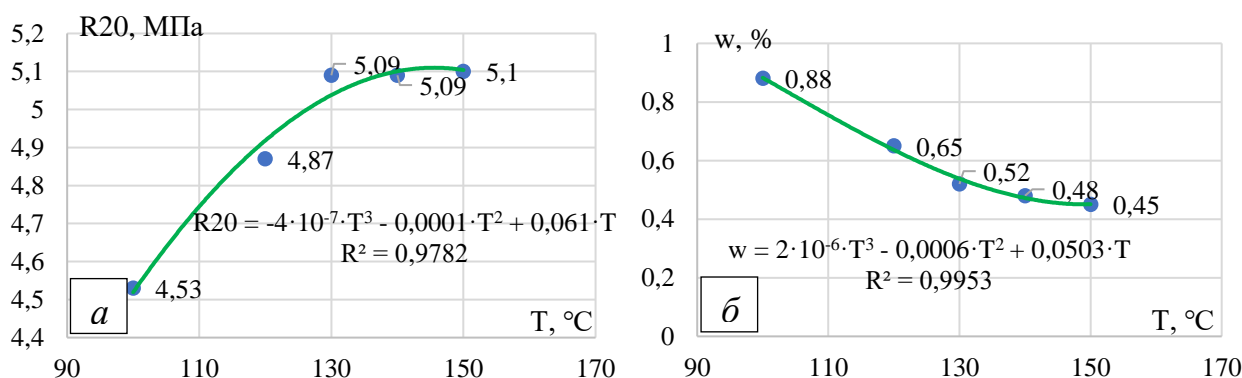


Рисунок 14 – Графики зависимостей: а) – зависимость предела прочности образцов от температуры гранулирования; б) – зависимость среднего водонасыщения образцов от температуры гранулирования (диапазон температур от 100 до 150 °С)

Графики зависимости коэффициента водостойкости образцов на минеральном порошке от температуры формования образцов без ПЭТФ и с содержанием ПЭТФ 15 % от массы битума представлены на рисунках 15,а и 15,б соответственно.

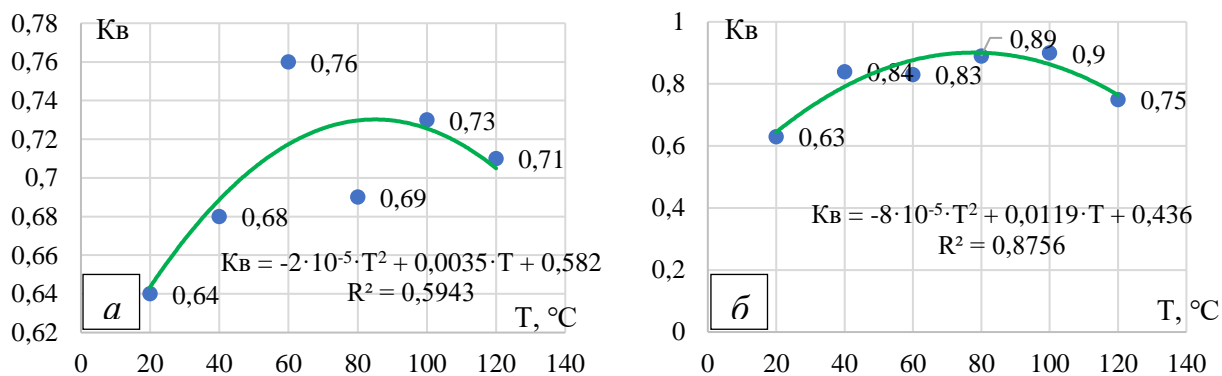


Рисунок 15 – Графики зависимости коэффициента водостойкости образцов на минеральном порошке от температуры формования образцов без ПЭТФ (а) и с содержанием ПЭТФ 15 % от массы битума (б) при диапазоне температур от 20 до 120 °С

Результаты исследований показали, что наибольшая средняя прочность наблюдалась у образцов, сформованных при температуре в диапазоне от 60 °С до 100 °С, наилучший результат по среднему водонасыщению – у теплых смесей, сформованных и уплотненных при температуре 80 °С и 100 °С, наибольший коэффициент водостойкости – у теплых смесей, сформованных при температуре 80 °С. Таким образом, уплотнение смеси может быть снижено более чем на 40 °С. На представленные результаты исследований получен патент.

В главе 7 описаны особенности формирования регулярного каркаса из гранулированного материала в процессе уплотнения.

Дальнейшее развитие разработанной теории открывает новые неисследованные направления получения функциональных гибридных композиционных материалов, основу которых составляют гранулы (готовый материал), полученные из разных по характеристикам и свойствам материалов, в том числе полученных на разных вяжущих и объединенных в единую композицию или систему. В результате комбинирование создаваемых гранул перед укладкой в готовое покрытие открывает возможность для получения качественно нового композиционного материала, проектирования готовой смеси и ее последующей эксплуатации.

На рисунке 16,*а* представлен пример образца, сформованного из гранул 10–15 мм для представления результата формирования композиционного материала (единой системы). На поверхности образца 1 видны границы зон контакта между отдельными частицами, что объясняется в первую очередь использованием монофракции. Испытания на водостойкость показали результат не ниже 0,85. На рисунке 16,*б* представлены аналогичные образцы, уплотненные до близкой к максимальной плотности (пористость 1%). При уплотнении до такого состояния границы между отдельными гранулами выражены слабо. В зависимости от реализуемых задач, композиционный материал в процессе формирования может иметь монолитную структуру и представлять собой комбинацию из отдельных гранул, как это изображено на рисунке 16,*а*.

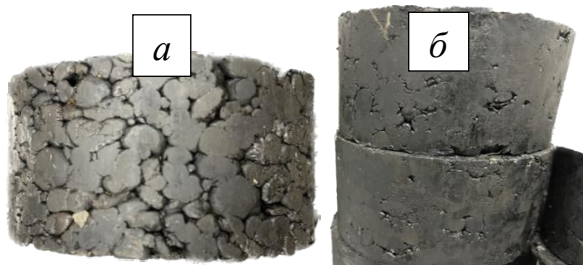


Рисунок 16 – Образцы, сформованные из гранул: *а*) – с наличием пор; *б*) – до практически монолитного состояния

Данные образцы были сформованы из гранул, полученных из одного материала, в частности из фосфогипса. При этом использование предложенной методологии получения гибридных композиционных материалов позволяет формовать образцы на основе гранул, сформированных из разных материалов.

В главе 8 представлены результаты внедрения и апробация результатов исследований гранулированной смеси на автомобильных дорогах, а также перспективы дальнейших исследований. Результаты испытаний признаны успешными, получены соответствующие акты внедрения.

В приложениях представлен акт внедрения результатов исследования, а также приведены результаты независимых испытаний.

Заключение

Данная диссертационная работа отражает результаты самостоятельно проведенных теоретических и экспериментальных исследований, посвященных решению обозначенной ранее научной проблемы.

Итоги исследования

1. Экспериментально и теоретически обосновано применение технологического приема гранулирования окатыванием для получения новых гранулированных смесей для дорожного строительства, включающих вторичные материалы (фосфогипс, солесодержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона). Получен патент на изобретение.

2. Разработана технология получения гранулированных смесей (переделов), отличающаяся от традиционной технологии приготовления асфальтобетонных смесей возможностью получения отдельных гранул с формированием структуры (упорядоченного расположения) из мелкодисперсных частиц внутри гранулы, достижением минимальной пористости, минимального расхода вяжущего и надежным капсулированием изучаемых вторичных материалов.

3. Впервые разработана математическая модель межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», отличительной особенностью которой является независимость от «физического существа» сил, формирующих взаимодействие фаз и описывающая эффекты структурирования мелкодисперсных частиц в композите.

4. Впервые разработана математическая модель межфазного взаимодействия слоев «жидкость–твердое», отличительной особенностью которой является независимость от «физического существа» сил, формирующих взаимодействие фаз, при учете эффектов структурирования мелкодисперсных частиц в композите.

5. Доказано, что перекрытие межфазных слоев в зазоре между твердыми поверхностями не приводит к изменению характера смачивания в зоне контакта фаз, но сопровождается формированием ядра межфазного слоя в центральной зоне зазора с постоянными значениями межфазных напряжений.

6. Разработаны и апробированы рецептуры гранулированных переделов, включающие фосфогипс, солесодержащие и гипсосодержащие отходы и гранулят старого асфальтобетона, отличительной особенностью которых является обеспечение возможности длительного хранения продуктов приготовления.

7. Разработанная технология модификации битума вторичным полиэтилентерефталатом в количестве 15 % обеспечивает водостойкость композиционного материала за счет наличия дисперсных частиц пластика размером от 1 мкм до 5 мкм, распределенного в объеме битума. Частицы пластика выступают в роли силовых центров, создающих дополнительное внутреннее давление в системе, препятствующее проникновению жидкости в вяжущее.

8. Результаты экспериментальных исследований показали, что фосфогипс, солесодержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона, как вторичные материалы могут быть использованы для приготовления гранулированной смеси (передела).

9. Результаты экспериментальных исследований показали, что гранулы представляют собой готовый передел (полуфабрикат).

10. Впервые установлено, что уплотнение гранулированной смеси целесообразно проводить в диапазоне температур от 20 °С до 120 °С, обеспечивающем достижение повышенных показателей по прочности и водостойкости (коэффициент водостойкости не менее 0,85). При этом наилучшие результаты наблюдаются при температуре уплотнения гранулированной смеси от 80 °С до 100 °С, что позволяет снизить температуру уплотнения на 40 °С. Получен патент на изобретение.

11. Описан механизм формирования каркаса композиционного материала, полученного в результате воздействия уплотняющей нагрузки, отличительной особенностью которого является деформируемость оболочек каждой отдельной сферической гранулы (передела), состоящей из минерального порошка и вяжущего. При этом каждая гранула, соприкасаясь с поверхностями соседних гранул, деформируется и преобразуется из сферической формы в «многогранную». Этот эффект позволяет достичь упорядоченной структуры композита с максимальной плотностью упаковки и минимальной пористостью.

12. Внедрены и прошли апробацию на реальных объектах автомобильных дорог гранулированные смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов (фосфогипс, полиэтилентерефталат, гранулят старого асфальтобетона) с получением актов наблюдений, испытаний и мониторинга. Результаты испытаний признаны положительными.

13. На основе обобщения результатов исследования и оценки перспективности дальнейших исследований в области развития и совершенствования функционально устойчивых дорожных композиционных материалов определены дальнейшие направления исследований.

Рекомендации, разработанные в диссертации, по получению функционально устойчивых дорожных гранулированных смесей (переделов) длительного хранения могут быть использованы при проектировании слоев покрытия автомобильных дорог в различных условиях эксплуатации после прохождения процедуры государственной стандартизации.

Перспективы и рекомендации дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в совершенствовании составов гранулированных смесей путем комбинирования отдельных гранул, полученных из разных материалов и сформованных в единую систему, с целью повышения универсальности и оперативности применения. Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, открывают широкое поле для более глубокого изучения механизмов формирования и получения гранулированных материалов, в том числе на основе применения механизмов комбинаторики. Появляется возможность комбинирования готовых систем из разных по свойствам и характеристикам материалов с возможностью проектирования новых композиционных материалов под заданные условия эксплуатации с их индивидуальными особенностями. Не менее важным аспектом является возможность более активного применения вторичных материалов при

приготовлении гранулированных систем, что имеет значительные перспективы для снижения экологической нагрузки на природную среду.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертационной работы:

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Российской Федерации:

1. Герасимов, Д.В. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона / Д.В. Герасимов, А. А. Игнатъев, В. М. Готовцев, И. В. Голиков // Дороги и мосты. – 2018. – № 2(40). – С. 304–315. – EDN KXRNTB.

2. Герасимов, Д.В. Структурированное асфальтовяжущее вещество - новый вид связующего в асфальтобетонных смесях / Д. В. Герасимов, А.А. Игнатъев, В. М. Готовцев // Транспортные сооружения. – 2021. – Т. 8. – № 3. – DOI 10.15862/07SAVN321. – EDN BNCBUI.

3. Игнатъев, А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы / А.А. Игнатъев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 1(63). – С. 14–30. – DOI 10.52409/20731523_2023_1_14. – EDN EXDWYX.

4. Игнатъев, А.А. Модель контактного взаимодействия жидкой и твердой фаз Транспортные сооружения. – 2023. – Т. 10. – № 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS223.pdf>. – DOI: 10.15862/11SATS223.

5. Игнатъев, А.А. Градиентная модель структурообразования в дисперсных системах / А. А. Игнатъев, В. М. Готовцев // Транспортные сооружения. – 2023. – Т. 10. – № 4. – URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS423.pdf>. – DOI: 10.15862/17SATS423.

6. Ignatyev, A.A. Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction /A.A. Ignatyev // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2024. – Vol. 110. No. 11002. DOI: 10.4123/CUBS.110.2

Публикации в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Web of Science, Scopus:

7. Ignatyev, A.A. Theoretical background for simulation of the interfacial layer “liquid-gas” / A.A. Ignatyev, V.M. Gotovtsev, P B. Razgovorov // Journal of Physics: Conference Series: II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 March, 2021. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – No. 22088. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/2/022088. – EDN OVVHVU.

8. Ignatiev, A.A. The modeling of interfacial contacts in composites using the sitting drop-solid body system as an example / A.A. Ignatiev, V.M. Gotovtsev, D.V. Gerasimov, P.B. Razgovorov // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 869 KEM. – P. 400–407. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400. – EDN GDREWJ.

9. Composite Aluminosilicate Materials for Sorption Extraction of Impurity Substances of Vegetable Oils / A.A. Ignatyev, P.B. Razgovorov, R.S. Nagornov [et al.] // Resources. – 2022. – Vol. 11. – No. 2. – DOI 10.3390/resources11020009. – EDN KLUH CJ.

10. Ignatiev A. Dispersed-filled composites with a structured nanoscale / A. Ignatiev, D. Gerasimov, I. Golikov, V. Gotovtsev // IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering: 21, Construction - The Formation of Living Environment, Moscow, 25–27 апреля 2018 года. Vol. 365, 3. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2018. – No. 032064. – DOI 10.1088/1757-899X/365/3/032064. – EDN VBOICS.

11. Ignatiev A. Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste / A. Ignatiev, D. Gerasimov, I. Golikov, V. Gotovtsev // MATEC Web of Conferences, Moscow, 14–16 ноября 2018 года. Vol. 251. – Moscow: EDP Sciences, 2018. – No. 01028. – DOI 10.1051/mateconf/201825101028. – EDN OPEEUM.

12. Gotovtsev, V.M. The effect of structuring composite building materials / V. M. Gotovtsev, A. A. Ignat'yev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, St. Petersburg, 20–21 июня 2019 года. Vol. 666. – St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – No. 012079. – DOI 10.1088/1757-899X/666/1/012079. – EDN VXOZLX.

13. Ignatyev, A.A. Theoretical background for simulation of physical processes in the interfacial layer "solid-liquid" / A. A. Ignatyev, V. M. Gotovtsev, P. B. Razgovorov // Journal of Physics: Conference Series: II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – No. 22077. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/2/022077. – EDN IKWKPV.

14. Ignatyev, A.A. Cold pelletized asphalt concrete mixture from reclaimed asphalt / A.A. Ignatyev, V.M. Gotovtsev, P.A. Slepnev // E3S Web Conferences – 2023. – Vol. 457.

15. Razgovorov P. Using Granulate Composites with Calcined Phosphogypsum and Pet Additive in Asphaltting / P. Razgovorov, A. Ignatiev, V. Gotovtsev, E. Vlasova // Materials Science Forum : Selected peer-reviewed full text papers, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года / International and Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Siberian Scientific Centre DNIT; Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall.. Vol. Vol. 1049. – Krasnoyarsk, Russian Federation.: Trans Tech Publications Ltd, 2022. – Pp. 257–265. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1049.257. – EDN AOLDGS.

Патенты:

16. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов Роспатент. Патент № 2762177. Заявка № 2021101348. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 16.12.2021. URL: <https://fips.ru/EGD/af0c6cd9-9e05-45e9-bb24-89aae4cc9974>

17. Способ получения гранулированного асфальтовяжущего на основе фосфогипса Роспатент. Патент № 2701007. Заявка № 2018124579. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 24.09.2019.