

На правах рукописи



**ГЕРАСИМОВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ГРАНУЛИРОВАННАЯ РЕМОНТНАЯ СМЕСЬ  
НА БИТУМНОЙ ОСНОВЕ,  
СОДЕРЖАЩАЯ ФОСФОГИПС  
И ВТОРИЧНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ярославль  
2025

Работа выполнена на кафедре «Инфраструктура и транспорт» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный технический университет».

Научный доктор технических наук, доцент  
руководитель: **Игнатъев Алексей Александрович**  
Официальные **Пугин Константин Георгиевич**, доктор  
оппоненты: технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Строительных технологий» ФГБОУ ВО «Пермский  
государственный аграрно-технологический  
университет имени академика Д.Н. Прянишникова».  
**Шорстова Елена Степановна**, кандидат  
технических наук, доцент кафедры «Теоретической  
механики и сопротивления материалов» ФГБОУ ВО  
«Белгородский государственный технологический  
университет им В.Г. Шухова».

Ведущая **Федеральное государственное бюджетное**  
организация: **образовательное учреждение высшего**  
**образования «Донской государственный**  
**технический университет».**

Защита состоится «28» мая 2025 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета У.2.1.5.50 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29, Научно-исследовательский корпус, аудитория Г.3.56).

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

Автореферат разослан «28» апреля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Усанова  
Ксения Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Асфальтобетон является вторым искусственным материалом по объёму выработки в мире после цементобетона, поскольку представляет собой универсальный материал для устройства прочных водонепроницаемых покрытий и конструктивных слоёв, что позволяет использовать его по различному назначению. Например, в качестве покрытия производственных помещений и площадок, устройства резервуаров, гидроизоляции гидротехнических объектов, устройства покрытий тротуаров, улиц и автомобильных дорог.

Для устройства указанных конструкций, и, что более важно, их содержания и ремонта, требуется большое количество ресурсов. Наиболее крупной отраслью, испытывающей острую потребность в асфальтобетонных смесях, является Транспортная отрасль. Транспортной стратегией РФ 2030, установлены актуальные направления достижения целевых показателей:

- развитие производства материалов с применением вторично переработанного сырья в целях снижения расхода невозобновляемых природных ресурсов;
- разработка ресурсосберегающих технологий, позволяющих удешевить производство строительных материалов и повысить производительность работ;
- разработка новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и физико-механическими свойствами.

Следовательно, обозначена потребность в композиционных материалах для ремонта асфальтобетонных покрытий с применением сырья на основе переработанных отходов в качестве замены традиционных компонентов асфальтобетонных смесей. В рамках данного исследования рассмотрены следующие вторичные сырьевые ресурсы: фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат.

**Степень разработанности темы исследования.** Дорожное хозяйство является одной из целевых отраслей для внедрения технологий производства материалов с применением вторично переработанного сырья. Уровень активности в мировых наукометрических базах показывает высокую заинтересованность в материалах, включающих в составе переработанные промышленные и

бытовые отходы, в том числе фосфогипс или вторичный полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Допустимо выделить два вектора научных исследований:

1) поиск путей снижения стоимости дорожно-строительных материалов и экономии традиционных сырьевых компонентов из невозобновляемых природных ресурсов, за счёт замещения одного или нескольких традиционных сырьевых компонентов переработанным сырьём, в том числе в целях его утилизации;

2) поиск путей повышения технико-эксплуатационных характеристик дорожно-строительных материалов за счёт включения в состав модифицирующих добавок на основе вторично переработанного сырья.

Отмечено, что возможность совместного применения в битумоминеральных композициях фосфогипса и модифицированного вторичным полиэтилентерефталатом битумного вяжущего изучена недостаточно. В сторонних исследованиях отсутствуют исчерпывающие данные обоснования зависимостей рационального компонентного состава и физико-механических свойств, а также зависимостей формирования и прогнозирования микро- и макроструктуры подобных композиций.

**Рабочей гипотезой** является возможность создания эффективного и экономически конкурентоспособного материала для ремонта поврежденных асфальтобетонных покрытий, содержащего фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат.

**Целью работы** является разработка и апробация научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение ремонтной смеси на битумной основе, содержащей фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат.

В соответствии с целью работы определены следующие **задачи**:

1) определение приоритетного компонентного состава модифицированного вторичным полиэтилентерефталатом битумного вяжущего и асфальтовяжущего вещества на основе фосфогипса;

2) разработка технологического метода построения и изучение механизма образования прочной водостойкой структуры, гарантирующей плотную упаковку частиц сульфата кальция (фосфогипса) с исключением структурных неоднородностей и достижением целевых показателей комплекса свойств;

3) разработка рационального состава и изучение свойств гранулированной ремонтной смеси на битумной основе, содержащей фосфогипс и вторичный ПЭТФ;

4) обоснование технологического решения, обеспечивающего получение гранулированной ремонтной смеси, содержащей фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат (ГРС) с заданным комплексом целевых физико-механических свойств;

5) разработка проекта опытно-промышленной линии производства ГРС и определение стоимостных показателей нового материала.

**Объектом исследования** является композиционный материал для ремонта асфальтобетонных покрытий, содержащий вторично переработанные сырьевые компоненты.

**Предметом исследования** является рациональный состав и физико-механические свойства ремонтной смеси на битумной основе, содержащей в составе фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат.

#### **Научная новизна работы:**

1) Научно обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение получения ремонтной смеси на битумной основе, методом производства гранулирования окатыванием (ГРС), заключающееся в послойном формировании вокруг частиц крупного заполнителя (ядер фракционированного щебня габбро) оболочек асфальтовязущего вещества сформированного дисперсной фазой частиц полугидрата сульфата кальция (фосфогипса типа Б) и непрерывной дисперсионной средой вязкого дорожного битума (БНД 60/90), модифицированного микродисперсией частиц вторичного полиэтилентерефталата, что обеспечивает достижение требуемых физико-механических показателей.

2) Предложено и научно обосновано применение в качестве мелкого минерального заполнителя полугидрата сульфата кальция, обладающего однородной кристаллографией частиц и в 2-3 раза большей удельной поверхностью ( $10,8 \text{ м}^2/\text{г}$ ) в сравнении с карбонатными минеральными порошками, который совместно с методом производства гранулирования окатыванием и применением гидрофобной микродисперсии вторичного полиэтилентерефталата размером от  $10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  мм распределённой в среде вязущего, обеспечивает достижение синергетического эффекта с формированием высокой адгезионной сорбции и ростом вероятности

взаимопересечения структурированных межфазных слоёв вяжущего в плёночном состоянии вокруг кристаллов полугидрата сульфата кальция с обеспечением плотной упаковки, требуемой механической прочностью асфальтовяжущего и снижением водонасыщения.

3) Разработаны и экспериментально подтверждены с высокой степенью обеспеченности математическая модель гранулометрического состава и математическая модель «состав-свойство», описывающие закономерности формирования контактной структуры каркаса щебня и влияния соотношения компонентов, технологических параметров процесса изготовления, на комплекс целевых физико-механических свойств ГРС, обуславливающие рациональный состав (щебень габбро 5 – 8 мм: 58,67 %; фосфогипс тип Б: 31,33 %; битум БНД 60/90 модифицированный 10 % вторичным полиэтилентерефталатом от общей массы вяжущего: 10,00 %).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования гранулированных ремонтных смесей на битумной основе, содержащих в составе фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат, что позволяет обеспечить требуемые технико-эксплуатационные показатели и утилизировать (переработать) указанные промышленные и бытовые отходы без вреда для биосферы. Применение полученных в ходе работы данных допустимо в целях дальнейшего расширения и изучения научной методологии переработки прочих мелкодисперсных промышленных и полимерных бытовых отходов как с применением метода производства гранулирования окатыванием, так и без него.

Разработан рациональный состав и технология производства гранулированной ремонтной смеси на битумной основе, содержащей в составе фосфогипс и вторичный ПЭТФ в 2 – 2,5 раза превосходящей аналоги из числа холодных асфальтобетонных смесей по уровню физико-механических показателей ( $\rho_0 = 2,35 \text{ г/см}^3$ ,  $R_{\text{сж.с}}^{20} = 3,80 \text{ МПа}$ ,  $R_{\text{сж.в}}^{20} = 2,41 \text{ МПа}$ ,  $R_{\text{сж.д.в}}^{20} = 1,84 \text{ МПа}$ ,  $W = 5,65 \%$ , пористость – 9,12 % при уровне значимости 0,95) и от 1,6 до 2,7 раз меньшей стоимостью.

**Методология исследования.** Теоретической базой исследования являются фундаментальные результаты исследований отечественных и зарубежных учёных в области строительного материаловедения. Руководствуясь системно-структурным подходом применялись методики и оборудование предусмотренное государственными

стандартами для исследования и определения физико-механических свойств минерального порошка, битума и органоминеральных смесей. Исследование свойств сырьевых материалов и процессов структурообразования исследуемого материала проводилось с применением современных методов анализа: метод BET и STSA, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ EDS, дифференциально-сканирующая калориметрия DSC и другие.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) Закономерности влияния рецептурно-технологических показателей на процесс образования дисперсии частиц вторичного полиэтилентерефталата в среде нефтяного дорожного битума;

2) Закономерности влияния рецептурно-технологических показателей на комплекс физико-механических свойств и структуру уплотнённой ГРС;

3) Технологическое решение получения гранулированной ремонтной смеси на основе битума, содержащей фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат;

4) Рациональный состав и способ получения ГРС;

5) Опытно-промышленная линия производства холодной ГРС.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: International Scientific Conference on Advanced In Civil Engineering «FORM-2018» (г. Москва, 2018), VI International Scientific Conference «IPICSE–2018» (г. Москва, 2018, г.), Всероссийской научно-технической конференция студентов, магистрантов и аспирантов (г. Ярославль, 2019 – 2024), научно-практическом форуме с международным участием «Smart Build» (г. Ярославль, 2020 – 2024), Всероссийской научной студенческой конференции НИУ ВШЭ «Молодежь и наука» (г. Нижний Новгород, 2021), Международной научной конференции «Социотехническое строительство» (г. Казань, 2023), International Scientific and Practical Symposium «FCI-2023» (г. Москва, 2023), конкурсе Фонда Содействия Инновациям РФ «УМНИК» (договор № 12486ГУ/2017) (г. Ярославль, 2017) и «СТАРТ» (договор № 23ГС1С7-И5/55485) (г. Москва, 2019).

**Внедрение результатов исследования** и независимая оценка материала в натуральных условиях производилась на улицах города Ярославля (АО «Ярдормост» при содействии Агентства по муниципальному заказу ЖКХ города Ярославля), участках трассы М8

«Холмогоры» (филиал «Петровское» АО «Мостотрестсервис» в Ярославской области), территории филиала АО «Апатит» г. Балаково.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы: в 5 статьях в журналах, рекомендованных ВАК к опубликованию основных результатов научных работ (1 из 5 входящих в RSCI); в 1 статье в журнале, индексируемом Scopus и 4 работах в виде тезисов конференций WoS и Scopus. Материалы исследования послужили основой для двух патентов РФ: № 2701007 (заявл. 04.07.2018, опубл. 24.09.2019) и № 2762177 (заявл. 22.01.2021, опубл. 16.12.2021).

**Личный вклад автора** заключается: в формулировании целей и задач исследования; участии в процессе определения рационального состава и технологических параметров изготовления гранулированной ремонтной смеси (ГРС) путём выполнения и анализа цикла лабораторных и натуральных экспериментальных исследований; разработке проекта опытно-промышленной линии производства материала; опубликовании основных результатов исследования.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из: введения, пяти глав, выводов, словаря терминов и библиографического списка. Работа изложена на 212 страницах машинописного текста, включающего 54 таблицы, 48 рисунков, 13 приложений и библиографический список из 179 наименований.

**Область исследований соответствует** паспорту специальности 2.1.5. «Строительные материалы и изделия»: п. 1 «Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых», п. 9 «Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и обозначены задачи исследования, приведена общая характеристика работы, в том числе представлена научная

новизна, выносимые на защиту положения, аргументирована теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** представлен обзор экологической обстановки, связанной с глобальным загрязнением окружающей среды промышленными и бытовыми отходами. Предложено одно из направлений рационального комплексного решения проблем загрязнения окружающей среды и растущей потребности в строительных материалах и изделиях за счёт включения в их состав переработанных промышленных и бытовых отходов. Сформулирована гипотеза об улучшении физико-механических свойств минеральных смесей на битумной основе с новым составом, содержащих промышленные и бытовые отходы, особенностью которых является применение альтернативных способов совмещения компонентов.

В качестве сырьевых материалов из числа промышленных и бытовых отходов определены фосфогипс – технический гипс, побочный продукт получения экстракционной фосфорной кислоты и фосфатных минеральных удобрений из апатитового концентрата по сернокислотной технологии, а также вторичный полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – переработанная тара для жидкостей (хлопья – флекса), изготовленная из термопластичного полимера класса сложных полиэфиров.

Представлен обзор научных публикаций и патентной базы применения указанных отходов в схожих по назначению битумоминеральных композициях.

**Во второй главе** определён принципиальный состав и назначение сырьевых компонентов в структурообразовании новой битумоминеральной композиции.

Ремонтная смесь при уплотнении образует бикомпонентную двухуровневую систему. На макроуровне дисперсная фаза крупного заполнителя (щебня) распределена в дисперсионной среде асфальтовяжущего вещества. На микроуровне дисперсная фаза мелкого минерального заполнителя (фосфогипса) распределена в дисперсионной среде модифицированного ПЭТФ битумного вяжущего.

В качестве крупного каменного заполнителя определена узкая фракция щебня габбро-диабаз фр. 5 – 8 мм, полученная отсевом частиц менее 5 мм на сито КП-109/1 по ГОСТ 8269.0-97 щебня фракции 4 – 8 мм по ГОСТ 32703-2014.

В качестве мелкого минерального заполнителя определён фосфогипс типа А ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) по ТУ 2141-693-00209438-2015 из отвала складирования Балаковского филиала АО «Апатит». Для сравнительного анализа приоритетного типа сырья и получения фосфогипса типа Б ( $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ) исходное сырьё ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) прокаливало при температуре 200 °С до постоянной массы в сушильном шкафу.

В качестве битумного вяжущего к сравнительному анализу представлены битумы марок БНД 60/90 и БНД 90/130 по ГОСТ 22245-90 АНК «Башнефть» г. Уфа.

В качестве модифицирующей битум добавки определён вторичный полиэтилентерефталат (ПЭТФ-флекса – измельчённая тара из полиэтилентерефталата) фракции 10 – 12 мм, производства ООО «ЯрФлекса» г. Ярославль.

Описано оборудование и методы термического анализа, исследования дисперсного и химического состава, структуры и физико-механических свойств исходных компонентов и конечных структурных элементов битумо-минеральной смеси.

**В третьей главе**, руководствуясь результатами сравнительного лабораторного анализа, окончательно определено приоритетное сырьё и рациональный способ производства разрабатываемой битумо-минеральной композиции.

Ввиду удовлетворительной водостойкости асфальтовяжущего на основе фосфогипса типа Б (0,72), меньшей пористости, на 3,74 % большей удельной поверхности ( $10,8 \pm 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ ) в сравнении с маркой А установлено, что фосфогипс марки Б ( $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ) является предпочтительным для дальнейших исследований.

В целях повышения водостойкости асфальтовяжущего вещества на основе гидрофильного фосфогипса битум модифицирован микродисперсией ПЭТФ. Определён приоритетный способ физико-механической модификации без высокотемпературной деструкции полимера. В результате воздействия лопастей мешалки, при температуре битума 240 ( $\pm 5$ ) °С частицы ПЭТФ-флексы растягиваются в нити, многократно рвущиеся на короткие участки. На финальной стадии, температура битума снижается до 160 – 180 °С и капли расплава формируют микродисперсию.

Таблица 1 – Сравнение характеристик модифицированного ПЭТФ битума БНД

Маркировка образцов	Битум БНД 60/90					Битум БНД 90/130				
	Пенетрация, мм <sup>-1</sup>	Температура размягчения по «КиШ», °С	Индекс пенетрации	Температура хрупкости, °С	Интервал пластичности, °С	Пенетрация, мм <sup>-1</sup>	Температура размягчения по «КиШ», °С	Индекс пенетрации	Температура хрупкости, °С	Интервал пластичности, °С
КП	74,1	56,91	1,45	- 18,0	74,91	90,2	46,89	- 0,52	- 19,0	65,89
КП(Т)	73,5	56,88	1,38	-	-	89,9	47,13	- 0,46	-	-
БМ <sub>2</sub>	73,1	56,83	1,40	- 20,0	76,83	90,1	49,34	0,50	- 22,0	71,34
БМ <sub>4</sub>	72,6	56,92	1,40	-	-	87,2	51,03	0,98	-	-
БМ <sub>6</sub>	70,9	57,41	1,43	-	-	86,7	51,16	1,08	-	-
БМ <sub>8</sub>	67,5	57,69	1,35	-	-	85,4	52,33	1,46	-	-
БМ <sub>10</sub>	65,3	58,02	1,33	- 20,0	78,02	85,3	53,17	1,67	- 21,0	74,17
БМ <sub>12</sub>	65,2	58,09	1,34	-	-	84,1	51,48	1,26	-	-
БМ <sub>14</sub>	68,5	59,55	1,79	- 19,0	78,55	83,0	50,19	1,07	- 19,0	69,19
БМ <sub>16</sub>	70,4	60,37	2,04	-	-	85,9	50,04	1,29	-	-
БМ <sub>18</sub>	70,3	60,87	2,40	-	-	86,3	52,05	1,44	-	-
БМ <sub>20</sub>	70,8	-	-	-	-	88,7	52,57	1,45	-	-

Примечание: 1) БМ – битум модифицированный; 2) Индекс в маркировке соответствует %-му содержанию ПЭТФ; 3) Чем ярче цвет, тем ближе экстремум; 4) КП – контрольный образец битума; 5) КП(Т) – контрольный термоокисленный образец битума (подвергшийся аналогичной температурной обработке).

В качестве приоритетной основы к модификации определён битум БНД 60/90, ввиду более широкого температурного диапазона пластичности 78,02 °С (Табл. 1), более выраженных пиков энтальпии на диаграмме DSC, меньших рисков коагуляции и выпадения микродисперсии ПЭТФ в осадок. Частицы ПЭТФ являются дополнительными силовыми адсорбционными центрами (дисперсной фазой) в дисперсионной среде битума, модифицируя его надмолекулярную структуру, что сопровождается ростом физико-механических показателей и снижением поверхностной энергии, а, следовательно, и водонепроницаемости плёнки битума при концентрации ПЭТФ 10 % от общей массы модифицированного вяжущего.

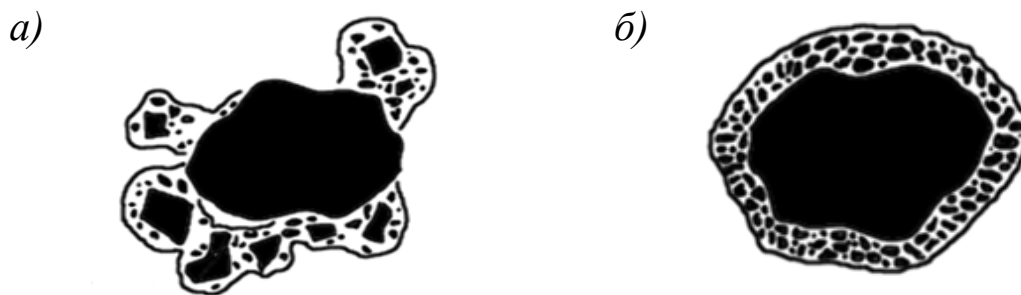
В целях повышения водостойкости и прочности разрабатываемого материала, в качестве метода производства

определён нетипичный метод смешивания компонентов битумоминеральных смесей гранулирование окатыванием (Рис. 1), подразумевающий попеременное нанесение модифицированного вяжущего и частиц (кристаллов) фосфогипса на частицы щебня (ядер гранул), вращающегося в грануляторе при температуре тарели 150 – 170 °С, обеспечивающий:

– равномерное распределение модифицированного вяжущего в среде асфальтовяжущего, с созданием непрерывной матрицы битума (дисперсионной среды) в плёночном состоянии, смачивающего и герметично упаковывающего частицы (кристаллы) фосфогипса, являющиеся дисперсной фазой;

– равномерное нанесение оболочек асфальтовяжущего по поверхности щебня (ядер гранул), что в последствии позволяет в ходе операции уплотнения добиться растекания (расплющивания) оболочек с заполнением пустот минерального каркаса и обеспечением контактной каркасной структуры, однако при этом не проявлять склонности к агрегации частиц при хранении в холодном состоянии.

Схема единичного элемента (гранулы) ГРС в сравнении с структурой традиционной битумоминеральной смеси (АБС) представлена на Рисунке 1(б).



*а) по традиционной технологии смешивания битумоминеральных смесей (АБС); б) по технологии гранулирования окатыванием (ГРС).*

Рисунок 1 – Схема сравнения единичного элемента структуры АБС и ГРС

Применение метода производства гранулирования окатыванием позволяет существенно повысить долю структурированного вяжущего в межфазных слоях вокруг частиц фосфогипса, а также увеличить долю взаимного «перекрывания» межфазных слоёв (Рис. 2), что приводит к увеличению давления в жидкостных прослойках (расклинивающий

эффект). Появление в жидкостных прослойках вязущего микродисперсии вторичного ПЭТФ приводит к усилению расклинивающего эффекта. Таким образом, в результате синергизма применяемого технологического метода, особенностей сырьевых материалов и процесса их технологической подготовки, удаётся достичь общего повышения физико-механических характеристик ГРС.

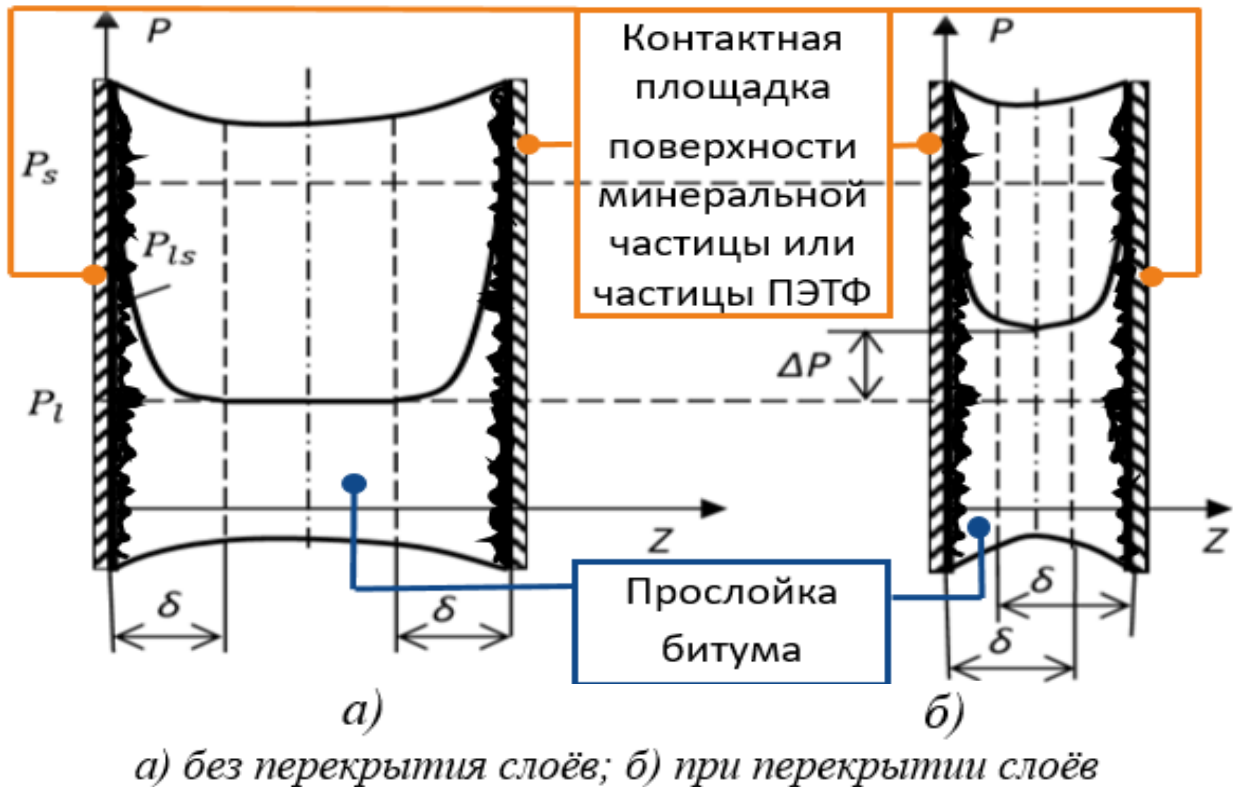


Рисунок 2 – Характер давлений в межфазном слое

В четвёртой главе представлены результаты математического моделирования: стохастическая модель определения параметров дисперсии вторичного полиэтилентерефталата и процесса её образования в среде битумного вязущего, мультикритериальная модель определения рационального соотношения компонентов «состав-свойство», модель гранулометрического состава ГРС, а также результаты лабораторных экспериментов и полевых испытаний.

Разработанная стохастическая модель формирования дисперсии вторичного полиэтилентерефталата в ходе процесса модификации позволяет определить основные параметры дисперсии ПЭТФ:  $D_b^{cp}$  – средний диаметр,  $S^{cp}$  – средняя площадь удельной поверхности,  $V^{cp}$  – средний объём (1) – (3), а также минимальные приемлемые требования

к технологическому оборудованию, применяемому в ходе процесса её образования: минимальный диаметр смесительного реактора, а также линейную и угловую скорость вращения лопасти смесителя  $v_0$  и  $\omega$  соответственно.

$$D_b^{cp} = \frac{A}{Nb_1} (D_{b_{max}} - D_{b_{min}}) b_2; \quad (1)$$

$$S^{cp} = \frac{\pi A D_0^2}{Nb_1} (D_{b_{max}} - D_{b_{min}}) b_2; \quad (2)$$

$$V^{cp} = \frac{\pi A D_0^3}{6Nb_1} (D_{b_{max}} - D_{b_{min}}) b_2. \quad (3)$$

Расчёт ведётся руководствуясь вероятностным подходом в фазовом пространстве  $d\Omega$ , используя безразмерные коэффициенты  $D_b$  и  $w$ . Рассчитанный размер дисперсии ПЭТФ в среде битума составил от  $10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  мм, что подтверждено данными исследований сканирующей электронной микроскопии (Рис. 3).

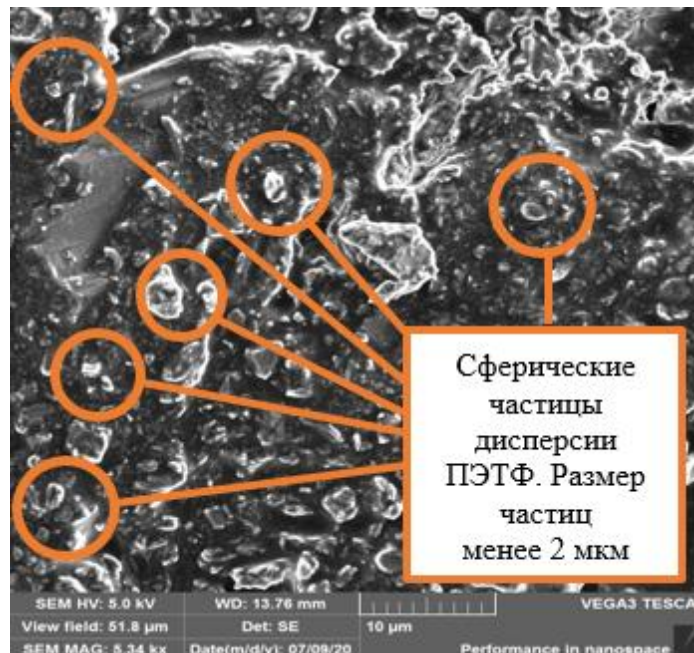


Рисунок 3 – Асфальтовязующее по технологии гранулирование окатыванием (10 мкм)

Разработанная мультикритериальная модель «состав-свойство» устанавливает зависимость свойств прочности, водонасыщения,

водостойкости и соотношения трёхкомпонентного композиционного состава ГРС, тем самым обеспечивая возможность определения рациональных рецептурных пропорций. В целях исключения дополнительных переменных и значительного упрощения математической модели, бикомпонентная система модифицированного вяжущего упрощена до монокомпонентной. Поскольку в соответствии с законом конгруэнции свойств профессора И. А. Рыбьева, содержание модификатора в составе вяжущего сводится к ранее определённой концентрации (10 % от массы вяжущего).

В качестве контрольных откликов свойств в результате вариаций составов компонентов определены показатели, схожие как для горячих, так и для холодных битумоминеральных смесей (из числа АБС смесей), соответствующие ключевым показателям, определённым профессором П. В. Сахаровым:  $Y_1$  – предел прочности при сжатии при 20 °С,  $Y_2$  – коэффициент водостойкости и  $Y_3$  – водонасыщение.

Решая многокритериальную задачу методом симплексных решеток с трансформацией подобласти и используя метод последовательных уступок, представлены регрессионные уравнения второго порядка, обеспеченностью 0,95 (4) – (6):

$$Y_1 = -36,36x_1^2 - 59,57x_1x_2 - 45,12x_1x_3 - 46,86x_2^2 - 218x_3^2 + 301,35; \quad (4)$$

$$Y_2 = -3,31x_1^2 - 3,96x_1x_2 - 2,85x_1x_3 - 4,88x_2^2 - 14,46x_3^2 + 24,95; \quad (5)$$

$$Y_3 = 39,96x_1^2 + 63,86x_1x_2 + 58,11x_1x_3 + 57,36x_2^2 + 153,65x_3^2 - 323,24. \quad (6)$$

Рациональное соотношение сырьевых компонентов: щебень габбро фр. 5 – 8 мм – 58,67 %, фосфогипс типа Б – 31,33 %, битум БНД 60/90 – 9 %, вторичный ПЭТФ (ПЭТФ-флекса фр. 10 – 12 мм) – 1 %. Экспериментально подтверждено, что при данном соотношении компонентов смеси, физико-механические показатели составили: предел прочности  $R_{сж}^{20} = 5,77$  МПа, водонасыщение  $W = 1,19$  %, коэффициент водостойкости  $K_B = 1,04$ , коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении  $K_{в,д} = 0,85$ . Температурный диапазон уплотнения смеси определён в пределах от 100 до 120 °С при экстремуме плотности  $\rho_0 = 2,45$  г/см<sup>3</sup>.

Также установлена возможность применения вязкого нефтяного дорожного битума БНД 60/90 для производства холодных

битумоминеральных ремонтных смесей при условии использования метода гранулирования окатыванием. Температура при уплотнении ГРС в холодном состоянии определена в 20 °С, плотность  $\rho_0 = 2,35$  г/см<sup>3</sup>, предел прочности в сухом состоянии  $R_{\text{СЖ.С}}^{20} = 3,80$  МПа, предел прочности в водонасыщенном состоянии  $R_{\text{СЖ.В}}^{20} = 2,41$  МПа, предел прочности при длительном водонасыщении  $R_{\text{СЖ.Д.В}}^{20} = 1,84$  МПа, водонасыщение  $W = 5,65$  %.

Возможность использования материала в холодном состоянии является весомым преимуществом (упрощение технологии ремонта и возможность длительного хранения/транспортировки), а также облегчает проектирование опытно-промышленной линии производства. Ввиду установления данного факта основное назначение ГРС – холодный ремонтный состав для асфальтобетонных покрытий. ГРС получила буквенные индексы: ГРС<sub>Х</sub> – холодная, температура уплотнения не ниже 20 °С и ГРС<sub>Г</sub> – горячая, температура уплотнения от 100 до 120 °С.

Ввиду отсутствия в составе ГРС песка, в целях обеспечения необходимых параметров прочности и сдвигоустойчивости уплотнённой ГРС, используя данные гранулометрического состава щебня и полином 2-го порядка разработана математическая модель гранулометрического состава ГРС, что позволяет прогнозировать возможность обеспечения контактной структуры каркаса щебня.

При определении массовой доли фракций готовых гранул по крупности предполагается, что плотность покрытия на всех гранулах одинакова и равна  $\rho_{\text{покр}}$ , равная истинной плотности оболочек асфальтовяжущего. Тогда масса  $i$ -ой фракции после гранулирования  $m_i^*$  будет определяться по выражениям (7) и (8):

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 5 \\ 0,035x^2 - 0,41x + 1,18, & \text{при } 5 \leq x \leq 11,2. \\ 1, & \text{при } x > 11,2 \end{cases} \quad (7)$$

$$m_i^* = m_i + k_{\text{фи}} \rho_{\text{покр}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\pi}{6} [(x_i + \lambda x_i)^3 - x_i^3] f(x) dx. \quad (8)$$

В расчете использовалось  $\lambda = 0,49$ , взятое с учетом необходимости увеличения объема органоминеральной смеси в результате наращивания оболочек асфальтовяжущего вокруг ядер щебня, обеспечивающего заполнение пустот каркаса. Коэффициент

формы щебня вычислен как отношение средней массы частиц к массе сферической частицы аналогичной фракции. С надежностью 0,90 было установлено, что теоретическое распределение не противоречит экспериментальному.

Объём пустот каркаса щебня составил от 31,20 до 41,21 %, с теоретическим диапазоном массы необходимого для заполнения структуры асфальто вяжущего от 39,58 до 53,78 %. При содержании асфальто вяжущего 41,33 % по массе, плотности  $\rho_{\text{покр}} = 1,96 \text{ г/см}^3$ , средней толщине оболочки асфальто вяжущего порядка 0,6 мм, остаточная пористость при формовании при 120 °С составила 3,07 %, а при 20 °С – 9,12 %, условия достижения контактной структуры каркаса щебня обеспечены.

Представленные математические модели позволяют конкретизировать технологические режимы изготовления и уплотнения ГРС. Данные экспериментов, независимых лабораторных и полевых испытаний подтверждают уровень заявленных характеристик и точность расчётов.

В пятой главе предложено научно обоснованное технологическое решение (Рис. 4) обеспечивающее получение гранулированной ремонтной смеси на битумной основе, содержащей фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат (ГРС).



Рисунок 4 – Технологическое решение получения ГРС

Разработан генеральный план и технологическая карта опытно-промышленной линии производства ГРС. Определены основные стоимостные характеристики материала: рассчитана себестоимость и сопутствующие затраты на производство, определены узлы из существующей номенклатуры промышленного оборудования Отечественного производства и рассчитана их взаимосовместимость.

Опытно-промышленная линия рассчитана на циклическую работу (4 цикла в час) производительность 1 т/час, рабочая смена 8 часов, 21 рабочий день в месяц, питание комбинированное (магистральный или сжиженный газ и трехфазная сеть 29,11 кВт/час среднего энергопотребления), потребность в кадровых ресурсах – 4 чел., потребность в механизированных ресурсах – 1 фронтальный погрузчик на базе МТЗ 82.1, разделена на пять блоков: 3 блока подготовки сырьевых компонентов, блок грануляции смеси, блок фасовки готовой продукции ГРС<sub>х</sub>.

Себестоимость ГРС<sub>х</sub> (Рис. 5) до исчисления налогов и прибыли составила 3942,76 руб/т, а цена 5677,67 руб/т с учётом НДС и рентабельности производства 20 % на конец 2021 – начало 2022 года, что сопоставимо с традиционными горячими асфальтобетонными смесями при близких по значениям физико-механических характеристиках. В свою очередь, прочностные свойства традиционных холодных асфальтобетонных смесей 2 – 2,5 раза ниже, при кратно большей цене в 1,6 – 2,7 раза по сравнению с ГРС<sub>х</sub>.



Рисунок 5 – ГРС<sub>х</sub>

**В заключении** приведены итоги выполненного исследования:

1) Экспериментально и теоретически обоснована рациональность применения фосфогипса типа Б (полугидрата сульфата кальция) в качестве мелкодисперсного заполнителя, полностью заменяющего традиционно применяемый в данных целях порошок на основе карбонатных пород в составе ГРС, при условии применения метода производства гранулирования окатыванием.

2) Экспериментально и теоретически обоснована рациональность применения вторичного ПЭТФ в качестве модификатора нефтяного дорожного битума БНД 60/90. При этом экстремум физико-механических характеристик модифицированного вяжущего зафиксирован при содержании полимера 10 % по массе вяжущего. Микрочастицы ПЭТФ являются центрами физической адсорбции битума, изменяющие его надмолекулярную структуру. Модификация обусловлена снижением поверхностной энергии и нахождением дисперсии ПЭТФ в межфазном слое с возникновением расклинивающего давления, препятствующего проникновению воды.

3) Доказано, что использование метода производства гранулирования окатыванием обосновано в целях повышения физико-механических свойств прочности, водонасыщения и водостойкости ГРС. Синергизм применяемых технологии смешивания и сырьевых компонентов заключается в следующем. Метод гранулирования окатыванием позволяет равномерно смочить, герметично упаковать вяжущим и на порядок повысить вероятность перекрытия межфазных слоев вяжущего вокруг гидрофильных частиц кристаллов фосфогипса, обладающих высокой структурирующей способностью ввиду развитой удельной площади поверхности (в 2 – 3 раза выше, чем у карбонатных минеральных порошков), что обуславливает рост механической прочности асфальтовяжущего и композиции в целом. В результате перекрытия межфазных слоёв, происходит рост давления в пленочных прослойках битума в сравнении с давлением в объемной фазе и создается расклинивающее давление, определяющее водоупорность системы. Наличие микродисперсии ПЭТФ в прослойках битума повышает вероятность перекрытия межфазных слоёв и снижает поверхностную энергию, интенсифицируя эффект гидрофобизации.

4) Разработана стохастическая модель процесса образования дисперсии вторичного ПЭТФ в среде БНД, спецификой которой представляется допустимость взаимоопределения дисперсности частиц полимера и характеристик технологического оборудования в зависимости от технологических параметров процесса. Рассчитанный размер частиц дисперсии ПЭТФ в среде битума составил от  $10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  мм, что подтверждено эмпирическими данными экспериментов.

5) На основании разработанной мультикритериальной математической модели «состав-свойство» для ГРС с обеспеченностью 0,95 определено и апробировано рациональное соотношение сырьевых

компонентов: щебень габбро фр. 5 – 8 мм – 58,67 %, фосфогипс типа Б – 31,33 %, битум БНД 60/90 – 9 %, вторичный ПЭТФ (ПЭТФ-флекса фр. 10 – 12 мм) – 1 %. Экспериментами с высокой сходимостью подтверждено, что при данном соотношении компонентов смеси физико-механические показатели составили: предел прочности  $R_{СЖ}^{20} = 5,77$  МПа, водонасыщение  $W = 1,19$  %, коэффициент водостойкости  $K_B = 1,04$ , коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении  $K_{B,д} = 0,85$ . Рациональная температура уплотнения определена в  $120$  °С при экстремуме плотности  $\rho_0^{120} = 2,45$  г/см<sup>3</sup>.

6) Доказана возможность применения вязкого нефтяного дорожного битума БНД 60/90 для производства ГРС<sub>х</sub>, при условии использования метода производства гранулирования окатыванием. Физико-механические показатели ГРС<sub>х</sub> до прогрева: плотность  $\rho_0^{20} = 2,35$  г/см<sup>3</sup>, предел прочности в сухом состоянии  $R_{СЖ,с}^{20} = 3,80$  МПа, предел прочности в водонасыщенном состоянии  $R_{СЖ,в}^{20} = 2,41$  МПа, предел прочности при длительном водонасыщении  $R_{СЖ,д,в}^{20} = 1,84$  МПа, водонасыщение  $W = 5,65$  %.

7) Разработана математическая модель гранулометрического состава ГРС, обосновывающая достижимость и факторы формирования контактной структуры каркаса щебня при уплотнении ГРС (при  $t_{упл} = 20$  °С и  $t_{упл} = 120$  °С). Объем каркаса щебня составил от 31,20 до 41,21 %, с требуемой для его заполнения массой асфальтовяжущего от 39,58 до 53,78 %. Доказано, что масса асфальтовяжущего составляет 41,33 % от общей, при плотности  $\rho_{покр} = 1,96$  г/см<sup>3</sup>. Остаточная пористость при уплотнении при  $120$  °С – 3,07 %, при  $20$  °С – 9,12 %.

8) Разработано эффективное технологическое решение производства ГРС, содержащей в составе фосфогипс и вторичный ПЭТФ, обеспечивающее получение гранулированного материала для ремонта асфальтобетонных покрытий широкого назначения с заданным комплексом физико-механических свойств при рациональных пропорциях сырьевых компонентов и технологических параметрах.

9) Разработан проект опытно-промышленной линии производства ГРС, определена взаимная совместимость технологических узлов, подобранных на основе коммерческих предложений (запроса стоимости) из числа существующих образцов отечественных производителей. Разработана технологическая карта и

генеральный план опытно-промышленной линии, производительностью 1 т/час. Произведён расчёт стоимостных характеристик ГРС<sub>х</sub>, руководствуясь особенностями технологического цикла, характеристиками оборудования, потребностями в материальных, энергетических и трудовых ресурсах. Себестоимость до исчисления налогов и прибыли составила 3942,76 руб/т, а цена 5677,67 руб/т с учётом НДС и рентабельности производства 20 % на конец 2021 – начало 2022 года, что сопоставимо с традиционными горячими асфальтобетонными смесями по цене и уровню физико-механических характеристик. В свою очередь, прочностные свойства традиционных холодных асфальтобетонных смесей в 2 – 2,5 раза ниже, при кратно большей цене в 1,6 – 2,7 раз по сравнению с ГРС<sub>х</sub>, содержащей фосфогипс и вторичный ПЭТФ.

10) Разработанный материал внедрен и в полевых условиях апробирован на объектах: ОАО «Ярдормост» (г. Ярославль), АО «Мостотрестсервис», филиал «Петровское» (рабочий посёлок «Петровское», Ярославская область), Агентства по муниципальному заказу (г. Ярославль) на автомобильных дорогах Ярославской области и улиц города Ярославля, подъездных путях к заводу АО «Апатит» (г. Балаково, Саратовская область). Независимая оценка в лабораторных условиях производилась в ГКУ ЯО «Ярославская областная дорожная служба».

11) Заключение независимых организаций характеризуют технологию ремонта асфальтобетонных покрытий с применением ГРС<sub>х</sub> с положительной стороны как с экономической, так и с технологической точек зрения. Отмечен сопутствующий экологический эффект, обусловленный утилизацией фосфогипса и отходов ПЭТФ.

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПЭТФ – полиэтилентерефталат. АБС – асфальтобетонная смесь; БНД – битум нефтяной дорожный;  $D_{b_{max}}$ ,  $D_{b_{min}}$  – максимальное и минимальное значение безразмерного показателя  $D_b = D/D_0$ , где  $D_0$  – средний размер, а  $D$  – случайный размер частицы ПЭТФ;  $N$  – число частиц, находящихся в потоке;  $b_1$ ,  $b_2$  – величины, зависящие от параметров смесительного оборудования, рассчитанные путём

сокращения математических формул;  $x_1, x_2, x_3$  – доля щебня габбро, фосфогипса и модифицированного ПЭТФ вяжущего соответственно;  $m_i$  – масса  $i$ -ой фракции до гранулирования;  $k_{\phi i}$  – коэффициент формы  $i$ -ой фракции определяемый как отношение средней массы частиц к массе сферической частицы аналогичной фракции;  $\lambda$  – константа, зависящая от общего объема покрытия на всех ядрах;  $f(x)$  – функция определяемая формулой  $f(x) = (dF(x))/dx$ ; ГРС – гранулированная ремонтная смесь на битумной основе, содержащая фосфогипс и вторичный ПЭТФ; ГРС<sub>ХГ</sub> – холодная/горячая гранулированная ремонтная смесь на битумной основе, содержащая фосфогипс и вторичный ПЭТФ; НДС – налог на добавленную стоимость.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Статьи в журналах, включенных ВАК РФ в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:**

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. (K3)

2) Герасимов, Д. В. Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочнённого композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси / Д. В. Герасимов, А. А. Игнатъев, В. М. Готовцев // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 5. – С. 11. – EDN: LATLKI. – URL: <https://esj.today/PDF/48SAVN520.pdf>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека ELIBRARY.RU. (K2)

3) 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. (K2)

4) Герасимов, Д. В. Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси / Д. В. Герасимов // Строительные материалы. – 2023. – № 9. – С. 65 – 71. – DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71. (K1, RSCI)

5) Герасимов, Д. В. Опытнo-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси / Д. В. Герасимов, А. А. Игнатьев // Умные композиты в строительстве. – 2024. – Т. 5 (4). – С. 75 – 89. – DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89. (К3)

#### **Патенты Российской Федерации:**

6) Пат. 2701007 Российской Федерации, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, С 04 В 18/04, В 09 В 3/00, С 04 В 111/20, С 04 В 111/27. Способ получения асфальтовяжущего на основе фосфогипса / Голиков И.В., Готовцев В.М., Игнатьев А.А., Герасимов Д.В.; заявитель и патентообладатель Ярославский гос. техн. универ. – № 2018124579; заявл. 04.07.2018, опубл. 24.09.2019.

7) Пат. 2762177 Российской Федерации, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, В 09 В 3/00. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов / Герасимов Д.В., Готовцев В.М., Игнатьев А.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПФ ГИГ». – № 2021101348; заявл. 22.01.2021, опубл. 16.12.2021.

#### **Статьи в журналах и изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:**

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. – Text : electronic // Key Engineering Materials. – 2020. – № 869. – P. 400 – 407. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400. (Q4/K3)

#### **Опубликованные труды конференций в других изданиях:**

9) Ignatiev, A. A. Dispersed-filled composites with a structured nanoscale / A. A. Ignatiev, D. V. Gerasimov, I. V. Golikov, V. M. Gotovtsev. – Text : electronic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 365. – P. 032064. – DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032064.

10) Ignatiev, A. A. Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste / A. A. Ignatiev, D. V. Gerasimov, I. V. Golikov, V. M.

Gotovtsev // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 251. – P. 01028. – DOI: 10.1051/matecconf/201825101028.

11) Ignatiev, A.A. Theoretical back-ground for simulation of physical processes in the interfacial layer "solid-liquid" / A. A Ignatiev, V. M. Gotovtsev, **D. V. Gerasimov**, G. V. Provatorova // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021). – 2021. – № 2131. – P. 022070. – DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022070.

12) **Gerasimov, D. V.** Research of the petroleum road bitumen modification process with secondary polyethylene terephthalate / **D. V. Gerasimov**, A. E. Lebedev, A. A. Ignatyev, A. A. Murashov. – Text : direct // FCI-2023, E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 457. – P. 01013. – DOI: 10.1051/e3sconf/202345701013.