

САЛАХОВА ВЕРОНИКА КОНСТАНТИНОВНА

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА, ЗАГРЯЗНЕННОГО НЕФТЕПРОДУКТАМИ,
В ПРОИЗВОДСТВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА**

1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Рудакова Лариса Васильевна**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шершнева Мария Владимировна**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры инженерная химия и естествознание
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», г. Санкт-Петербург
Коновалова Наталия Анатольевна
доктор технических наук, доцент, ведущий
научный сотрудник научно-исследовательского
проектно-технологического бюро «ЗабИЖТ-
Инжиниринг» Забайкальского института
железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ
ВО «Иркутский государственный университет
путей сообщения», г. Чита

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень

Защита диссертации состоится 14 декабря 2023г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.12, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru)

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.12
кандидат технических наук, доцент

Е.В. Калинина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ежегодное производство в РФ тары из полиэтилена низкого давления (ПНД), используемой для временного хранения и транспортировки нефтепродуктов (моторного масла), других смазочных материалов составляет около пятисот млн. штук. Высокая стабильность ПНД к воздействию окружающей среды (ОС), агрессивным химическим средам, делает общепринятую практику обращения с такими отходами малоэффективной. Моторное масло, остающиеся в таре после ее опорожнения, формирует повышенную техногенную нагрузку на ОС, при утилизации и захоронении, так как формируется вторичный поток отходов, обусловленный стадией предварительной очистки от моторного масла. Используемые методы сжигания и пиролиза ПНД формируют негативное воздействие на ОС, в виде газов и золы высокого класса опасности, с потерей материального ресурса. В этой связи, разработка ресурсосберегающей технологии утилизации отходов ПНД, загрязненных моторными маслами, является актуальной научной задачей.

Снизить негативное воздействие на ОС, формируемое отходами ПНД, загрязненными моторными маслами, возможно за счет разработки ресурсосберегающих, биопозитивных, климатически нейтральных технологий, позволяющих вовлечь отходы в производство востребованных на рынке продуктов, без формирования вторичного загрязнения ОС. Существующая практика использования полимеров в качестве модификаторов битума и моторных масел, для регулирования его вязкости, позволила определить направление утилизации тары, загрязненной моторным маслом, в технологии получения асфальтобетонов, используемых для дорожного строительства. Разработка такой технологии позволит создать условия для рециркуляции ПНД в технологических процессах при получении полезных продуктов, снизить техногенную нагрузку на ОС, за счет ресурсосбережения первичных сырьевых материалов, и включения опасных для ОС элементов (ПНД и моторного масла) в процессы структурообразования асфальтобетона. Тема диссертации соответствует **паспорту научной специальности 1.6.21. Геоэкология**, по пункту 17.

Научная гипотеза. Измельченная тара из ПНД, загрязненная моторным маслом, имея общую углеводородную основу с битумом, в процессе получения асфальтобетона способна встраиваться в его структуру, что обеспечит снижение водомиграционной опасности ПНД и моторного масла для ОС, и повысит потребительские свойства самого асфальтобетона.

Степень разработанности темы исследования. Разработке технологий использования материального ресурса отходов полимеров, в том числе загрязненных нефтью или нефтепродуктами, обеспечению геоэкологической безопасности посвящены работы Будникова И.В., Гаевой Е.В., Гончарук Г.П., Журавлевой Л.Л., Захарова В.П., Коноваловой Н.А., Левыкина Е.Н., Левушкина Д.М., Паномарева Н.В., Пикалева Е.С, Руш Е.А., Сутуриной Е.О., Толмачевой Н.А., Шершневой М.В., Шкуро А.Е., Nake S.L., Huang J., Xu X., Leng Z. Предлагаемые ими технологии утилизации требуют организацию стадии очистки отходов от загрязнений и характеризуются высокой энерго-ресурсоемкостью подготовительных процессов, что формирует вторичное загрязнение ОС.

Цель диссертационной работы – снижение геоэкологической нагрузки формируемой отработанной тарой из ПНД, загрязненной моторным маслом, за счет использования ее в технологии производства асфальтобетонов, отвечающих геоэкологической безопасности и потребительским требованиям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Оценить опасность отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, для ОС;

2. Разработать способ утилизации тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, с использованием ее материального ресурса в технологии получения асфальтобетонных смесей, удовлетворяющих строительным требованиям и обеспечивающих геоэкологическую устойчивость при эксплуатации.

3. Установить оптимальный состав асфальтобетона, получаемого с использованием отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, и оценить его физико-механические характеристики.

4. Произвести оценку геоэкологической опасности асфальтобетона, получаемого с использованием отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, а также технико-экономическую оценку способу утилизации тары.

Научная новизна:

Доказана возможность утилизации тары из ПНД, загрязненной моторным маслом (до 15% от массы ПНД), в составе асфальтобетона (до 17,5% от массы битума), с обеспечением снижения миграционной активности ПНД и моторного масла в геосферные оболочки, за счет их активного участия в процессах структурообразования асфальтобетона.

Установлено, что при утилизации тары из ПНД эмиссия моторного масла в геосферные оболочки, может составлять от 0,5% до 15,5% веса утилизируемой тары, в зависимости от вязкости моторного масла и объемно-массовых характеристик тары, такое количество моторного масла позволяет использовать отработанную тару без предварительной ее очистки в технологии получения асфальтобетона, тем самым исключить образование вторичного потока отходов.

Установлено, что использование ПНД в составе асфальтобетона позволяет снизить эмиссию углеводородов в атмосферный воздух при его эксплуатации в качестве дорожного покрытия для автомобильных дорог.

Установлены закономерности изменения физико-механических характеристик асфальтобетона от количества ПНД, загрязненного моторным маслом, установлено оптимальное их содержание, обеспечивающее геоэкологическую устойчивость и потребительские свойства. При содержании ПНД в асфальтобетоне до 17,5% от веса битума и моторного масла до 5% от веса ПНД, увеличивается: значение предела прочности при температурах 20°C и 50°C в 1,5 и 1,3 раза, соответственно; показатель сдвигустойчивости увеличивается в 1,4 раза, средняя плотность асфальтобетона снижается на 4,8 %.

Доказана геоэкологическая устойчивость асфальтобетона, полученного с использованием отходов тары из ПНД (17,5%), загрязненного моторным маслом (15% от массы ПНД). По итогам оценки эмиссии нефтепродуктов в водные среды и проведения биотестирования полученных асфальтобетонов установлено, что водная вытяжка не обладает эффектом токсичности на тест-объекты *Scenedesmus quadricauda* и *Daphnia magna* Straus.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании использования отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, в технологии получения асфальтобетона с повышенными физико-механическими характеристиками асфальтобетона и обеспечением геоэкологической устойчивости при его эксплуатации.

Способ утилизации отходов ПНД, загрязненных моторным маслом, в технологии производства асфальтобетона позволит использовать большие объемы вторичного сырья, без дополнительного дорогостоящего технологического оборудования, а также исключается стадия очистки ПНД от загрязнений. В этой связи, способ отвечает

критериям, по которым его можно отнести к биопозитивному и климатически нейтральному. Полученные модели регрессии влияния содержания ПНД в составе асфальтобетонной смеси позволяют спроектировать составы различного назначения.

Технико-экономическая оценка разработанного способа утилизации отработанной тары из ПНД показала свою эффективность (для смеси тип А, 1 марки - 231 руб. на тонну асфальтобетона в ценах 2023 года).

Научные и практические знания, полученные в ходе работы над диссертацией, использованы для разработки технического регламента на производство асфальтобетона с ПНД и внедрены в ООО «Дорожно-сервисная компания» г. Алапаевск, ООО «АБЗ №1» г. Пермь. Получен патент № 2799927 Асфальтобетон.

Методология и методы исследования. В ходе исследования использовались научные методы, применяемые при разработке способов снижения геоэкологической нагрузки на ОС при утилизации отходов потребления. При изучении свойств образцов ПНД и асфальтобетона использовались стандартные методики проведения испытаний и анализа полученных значений, указанные в нормативных документах. Для регистрации изменения физических и химических свойств битума, при его взаимодействии с ПНД, загрязненным моторным маслом, использовали синхронный термический анализ. Для оценки изменений жизнеобеспечивающих свойств водных сред, от действия ПНД, загрязненным моторным маслом, и полученного на их основе асфальтобетона, использовали методы химического анализа и биотестирование; методики испытаний, используемые для изучения и обобщения сведений о свойствах асфальтобетона.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценка геоэкологической опасности отработанной тары из ПНД, загрязненной моторным маслом.

2. Научное обоснование способа вовлечения отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, в состав асфальтобетонных смесей, основанный на способности частиц ПНД и моторного масла встраиваться в его структуру.

3. Закономерности изменений физико-механических характеристик, и оптимальный состав асфальтобетона, получаемого с использованием отработанной тары из ПНД, загрязненной моторным маслом.

4. Результаты исследования геоэкологической устойчивости асфальтобетона, получаемого с использованием отработанной тары из ПНД, загрязненной моторным маслом.

5. Способ утилизации отработанной тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, в составе асфальтобетона.

6. Технико-экономическая оценка способа утилизации отработанной тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, в состав асфальтобетонных смесей.

Степень достоверности и апробация результатов.

Научные положения и выводы получены с использованием современных методов исследования и анализа. Использовались широко применяемые методы экспериментальных исследований с привлечением сертифицированных лабораторий. Подготовка, статистический анализ и интерпретация полученных результатов осуществлены с использованием современных методов обработки информации.

Основные положения и результаты работы доложены на: Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (г. Пермь, 2020, 2021, 2022, 2023гг.); V международной научной конференции «От обращения с отходами к управлению ресурсами» (г. Пермь, 2021г.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Экологический мониторинг опасных промышленных

объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения» (г. Саратов, 2022г.); международных конференциях «Innovations And Technologies In Construction (BUILDINTECH BIT 2021)» (Белгород 2021 г.); «Наука молодых–будущее России» (г. Курск, 2019г.); «Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment» (Temryuk, 2021г.); Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире» (г. Казань, 2021 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них: 4 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Chemical Abstracts, 2 в журналах ВАК, получен патент.

Структура и объем работы. Текст диссертации размещен на 127 страницах. Состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии из 109 источников и 4 приложений. Текст содержит 33 рисунка, 34 таблицы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSNM-2020-0024 «Разработка научных основ экологически чистых и природоподобных технологий и рационального природопользования в области добычи и переработки углеводородного сырья».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы, цель, определены задачи для ее достижения. Представлены: научная новизна; теоретическая и практическая значимость; положения, выносимые на защиту; методы исследования; степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

В первой главе представлена информация по объему производства тары для транспортировки и временного хранения моторного масла, используемого в частном и промышленном секторе. Представлен обзор основных методов утилизации, обезвреживания и уничтожения моторного масла и отходов потребления из ПНД. Произведена оценка формирования техногенного воздействия при размещении тары в ОС.

При захоронении тары из ПНД, формируется механическое засорение и химическое загрязнение ОС. Деграция структуры ПНД сопровождается образованием микрочастиц (микропластика), которые формируют малоизученное, в настоящее время, засорение водной среды и атмосферы. Образующиеся продукты распада изменяют химический состав гидросферы, атмосферы и педосферы. Моторное масло, при попадании в ОС, формирует воздействие, которое способно изменять структуру ДНК растений, вызывать аутосомные и онкологические заболевания у человека. Используемые в настоящее время различные методы утилизации ПНД, с получением из них энергии (сжигание, пиролиз, гликолиз, гидролиз) и вторичного ПНД, требуют предварительную очистку отработанной тары от загрязнений. Для этих целей используют высокотемпературный водный раствор щелочей 4-5% и ПАВ 1-2 %. Соотношение отходов и воды составляет 1:10–1:15. Это формирует большой объем сточных вод и шлама, который требует последующего обезвреживания. Наличие остатков моторного масла в таре из ПНД в значительной мере повышает ее геоэкологическую опасность.

Во второй главе представлены характеристика объектов исследования, программа, методы и объемы исследования.

В качестве объектов для исследования использовали тару из ПНД, емкостью 1, 4, 10, 20 и 30 литров. Для определения толщины масляной пленки, которая и определяет объем моторного масла, остающегося после использования, использованы моторные масла различной вязкости (15w-40, 5w-40; 80w-90), наиболее широко используемые в

техническом сервисе. Исследования физико-механических характеристик асфальтобетона проводились в соответствии требованиям ГОСТ 9128-2013. Для приготовления асфальтобетонной смеси использовался: песок фракции 0-5 мм, в соответствии с ГОСТ 8735-2014; щебень, 10-20 мм, ГОСТ 8267-93; отсев дробления, 0 - 5 мм, ГОСТ 8735-2014; битум БНД 90/130, ГОСТ 22245-90. Токсикологические характеристики асфальтобетона, полученного с ПНД и моторным маслом оценивались по методикам МУ 2.1.674-97, ФР.1.39.2007.03222 и ФР. 1.39.2007.03223.

Для определения изменения физико-химических свойств битума с ПНД, загрязненного моторным маслом, использован метод синхронного термического анализа с совместным использованием термогравиметрии (ТГА) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

В работе для обработки полученных результатов, а также для определения оптимального состава асфальтобетона, разработан план проведения исследования, применяли метод математического планирования с использованием двухфакторного эксперимента с использованием программного пакета статистического анализа данных STATISTICA.

В третьей главе определено количество моторного масла, остающегося в отработанной таре, в зависимости от ее объемно-массовой характеристики, дана оценка влияния ПНД, загрязненного моторным маслом, на свойства битума, используемого в асфальтобетоне

Установлено, что в зависимости от объемно-массовой характеристики тары, вязкости моторного масла, угла наклона опорожнения тары (60°, 75° и 90°), температуры (+40°C, +20°C), в одной тонне отходов утилизируемой тары разного объема может находиться от 1,5 до 15,1% моторного масла. При утилизации тары меньшего объема будет формироваться большее техногенное воздействие на ОС, за счет необходимости использовать большее количество моющих средств и воды при подготовительных операциях.

Полученная оценка количества остатков моторного масла для тары различного объема может служить ориентиром для выбора способа или технологических процессов ее утилизации.

Измельченная тара из ПНД, загрязненная моторным маслом (ММ), формирует отдельный материальный поток с повышенным риском техногенного воздействия на ОС. Для оценки этого воздействия, формируемого измельченной тарой, различной по объему, произведено биотестирование измельченной тары с различным содержанием моторного масла (от 1,5 до 15% от массы ПНД) по ФР.1.39.2007.03222 и ФР. 1.39.2007.03223. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1– Результаты биотестирования с помощью *Scenedesmus quadricauda*

№	Концентрация водной вытяжки, %	Кратность разбавления	Отклонение от контроля (I, %)			Оценка токсичности
			Содержание ММ 1,5%	Содержание ММ 5%	Содержание ММ 15%	
1	100	1	- 27,8	- 17,1	- 10,1	не оказывает
2	50	2	-18,5	-27,2	-18,2	не оказывает
3	10	10	-9,9	-10,4	0,4	не оказывает
4	1	100	-6,6	-6,2	1,2	не оказывает
5	0,1	1000	0,0	2,6	4,6	не оказывает
6	0,01	10000	-2,0	1,8	6,8	не оказывает

Токсикометрический анализ результатов биотестирования ПНД, загрязненного ММ (1,5; 5; 15% от массы ПНД), показал, что безвредная кратность разбавления (БКР) водной вытяжки для *Scenedesmus quadricauda* – 1; 1; 2, для *Daphnia magna Straus* – 5,06; 68,25; 250,25, соответственно. В соответствии с Приказом Минприроды России от 04.12.2014 № 536 установлено, что измельченная тара из ПНД, с содержанием остатков моторного масла не более 7,5%, относится к 4 классу опасности для ОС.

Таблица 2– Результаты биотестирования с помощью *DaphniamagnaStraus*

№ п/п	Концентрация водной вытяжки, %	Кратность разбавления	I, %	Оценка токсичности	I, %	Оценка токсичности	I, %	Оценка токсичности
				Содержание ММ 1,5%		Содержание ММ 5%		Содержание ММ 15%
1	100	1	40	оказывает	70	оказывает	80	оказывает
2	50	2	20	оказывает	60	оказывает	70	оказывает
3	10	10	5	не оказывает	20	оказывает	40	оказывает
4	1	100	0	не оказывает	10	не оказывает	25	оказывает
5	0,1	1000	0	не оказывает	0	не оказывает	10	не оказывает
6	0,01	10000	0	не оказывает	0	не оказывает	0	не оказывает

Для установления влияния ПНД на свойства битума в качестве модифицирующего компонента, проведен синхронный термический анализ с использованием методов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) на установке STA449 Jupiter и исследование фазового состава образцов с использованием рентгеновского дифрактометра XRD-7000 фирмы «Shimadzu».

Для изучения температурной устойчивости битума с ПНД проведен синхронный термический анализ образцов исходного битума и смеси битума с ПНД. Фрагменты термограмм представлены на рисунке 1.

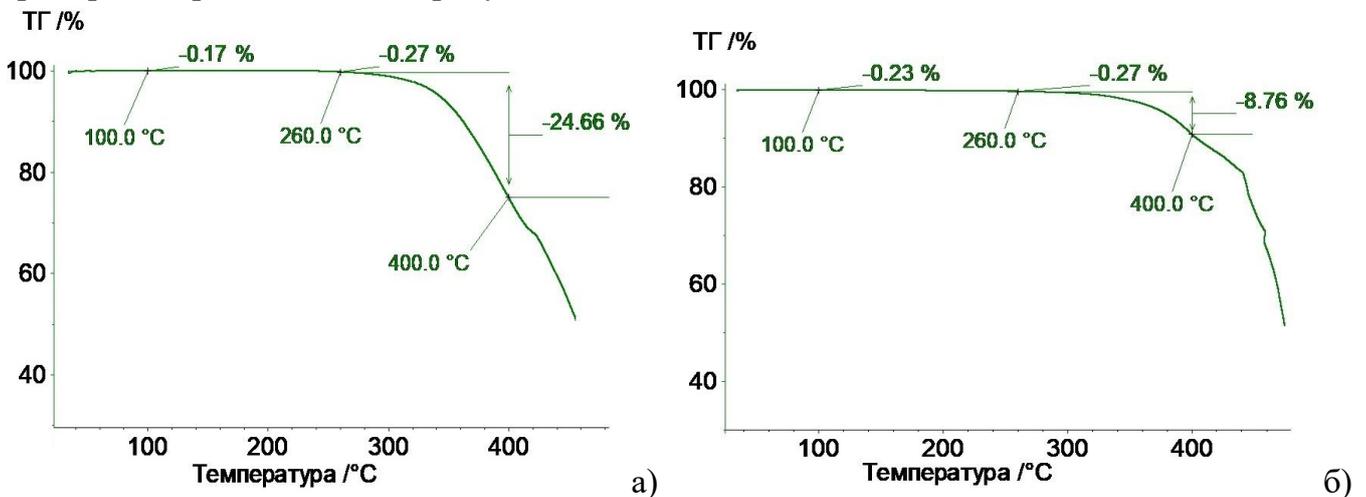


Рисунок 1 – Фрагменты термограмм: а) битума, б) смеси битума с ПНД

По результатам термогравиметрического анализа установлен эффект снижения потери массы битума в 2,8 раза в варианте с ПНД при температуре 400°C. Повышение температурной устойчивости битума с добавкой ПНД позволяет снизить эмиссию углеводородов из асфальтобетона в атмосферный воздух. Кроме того, за счет сохранения пластичности битума увеличивается срок эксплуатации асфальтобетона.

С использованием рентгеновского дифрактометра произведены сравнительный анализ фазового состава образцов битума и битума с ПНД. Дифрактограммы образцов чистого битума и битум с добавлением ПНД 20% представлены на рисунке 2.

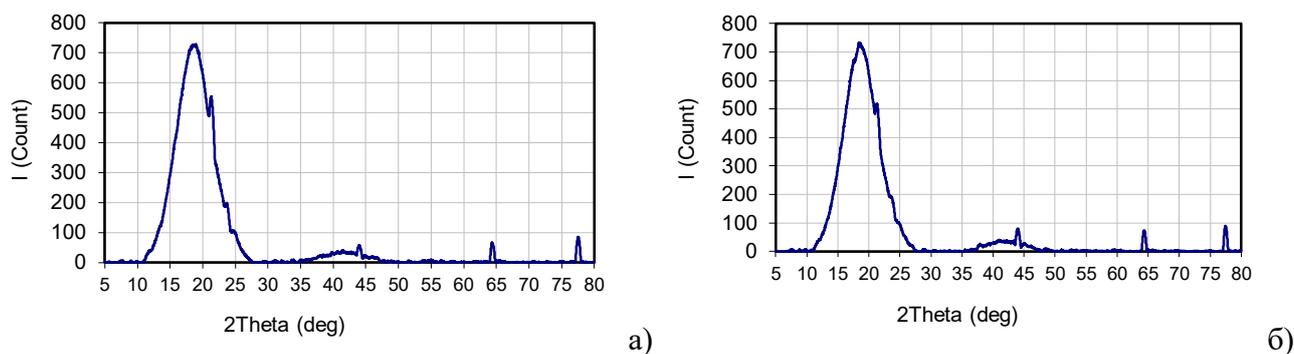


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов: а) битума, б) битум с добавлением ПНД

Сравнительный анализ полученных дифрактограмм не выявил существенного изменения фазового состава битума.

В виду того, что моторное масло может быть использовано в качестве разжижителя битума, установлено максимальное содержание моторного масла, при котором показатели битума изменяются в допустимых пределах, не нарушая процессы структурообразования асфальтобетона. За основной показатель свойств битума выбрана глубина проникновения иглы при 25°C. При добавлении моторного масла в битум в количестве от 1 до 5%, происходит постепенное разжижение битума, с изменением вязкости битума в пределах исходной марки или перевод марки БНД 70/100 в марку БНД 100/130. Исследование других показателей битума, которые регламентирует ГОСТ 33133-2014, показали, что возможно добавление моторного масла в битум до 3%. Это позволяет использовать тару, загрязненную моторным маслом (до 15% от массы тары), в составе асфальтобетона до 20% без существенного влияния на свойства битума. Это подтверждает возможность разработки способа утилизации тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, без стадии ее очистки.

Равномерное распределение частиц ПНД в смеси минеральных компонентов асфальтобетона позволяет произвести его объемное армирование. Перераспределение сил в асфальтобетоне и частицы ПНД после формования образцов асфальтобетона и экстрагирования показаны на рисунке 3.

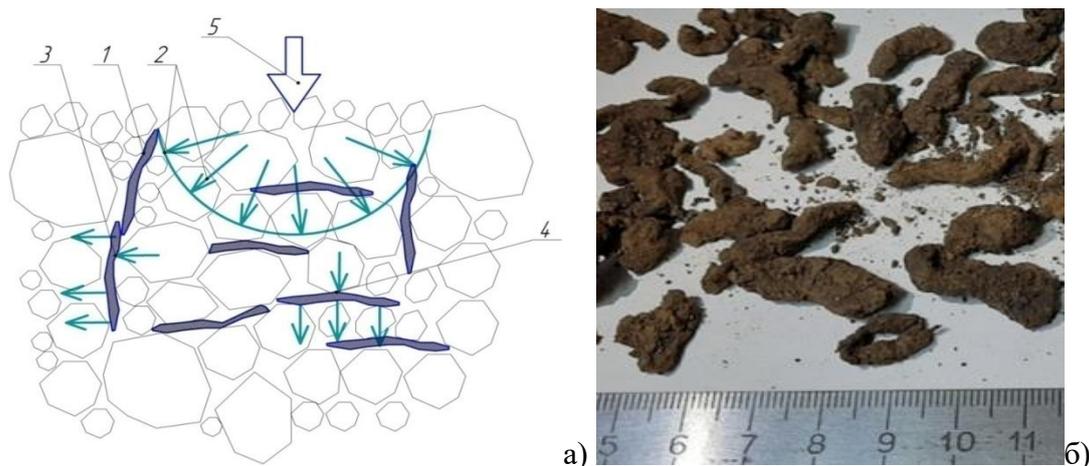


Рисунок 3 – Частицы ПНД в структуре асфальтобетона: а) схема перераспределения действия сил в структуре асфальтобетона, 1 – ПНД, 2 – распределение сил в структуре асфальтобетона при действии вертикальной внешней нагрузки, 3, 4 – распределения нагрузки через ПНД, 5 - нагрузка от воздействия колес автотранспорта; б) частицы ПНД после экстрагирования.

Частицы ПНД, имея линейные размеры больше размера щебня, позволяют распределить внешнее усилие на большую площадь, и, тем самым, снизить величину удельного давления на отдельные частицы минерального каркаса асфальтобетона и повысить устойчивость всего слоя. Для определения формы частиц ПНД и их расположения в структуре асфальтобетона, после формования образцов, образцы асфальтобетона были подвергнуты экстрагированию. Форма и шероховатая структура поверхности частиц ПНД позволяют сделать вывод об эффективной работе частиц в структуре асфальтобетона в качестве армирующего элемента.

Ресурсный потенциал измельченной тары из ПНД загрязненной моторным маслом возможно использовать в качестве модификатора битума и армирующего элемента в структуре асфальтобетона, достигая снижения негативного воздействия на атмосферный воздух, и увеличивая срок службы асфальтобетона.

В четвертой главе представлены показатели физико-механических характеристик асфальтобетона, полученного с ПНД, произведена оптимизация состава асфальтобетона, разработана технологическая схема процесса получения асфальтобетона с использованием ПНД. Показано, что при использовании ПНД в составе асфальтобетона, равномерное распределение ПНД в структуре асфальтобетона достигается за меньшее время при предварительном смешивании ПНД и минеральных материалов, затем происходит смешивание с битумом.

Для определения оптимального состава асфальтобетонной смеси с ПНД использованы три серий образцов с различным содержанием ПНД, таблица 4.

Таблица 4 – Физико-механические характеристики асфальтобетона с различным содержанием ПНД и моторного масла (5% от массы ПНД).

Показатели	ГОСТ 9128	Без ПНД	ПНД 5%	ПНД 17,5%	ПНД 30%
Пористость минеральной части, %	14-19	15,39	15,4	14,5	13,1
Средняя плотность, г/см ³	-	2,55	2,47	2,45	2,43
Остаточная пористость, %	2,5-5,0	3,57	3,2	3,01	2,02
Трещиностойкость (при расколе)	3,0-6,5	5,01	5,08	5,15	5,18
Водонасыщение, %	1,5-4,0	1,88	1,55	1,38	1,19
Сдвигоустойчивость по: коэфф. внутрен. трения	>0,81	0,91	0,91	0,93	0,92
Сдвигоустойчивость по сцеплению	>0,35	0,38	0,38	0,40	0,39
Водостойкость,	>0,85	0,90	0,96	0,98	0,96
Предел прочности (МПа):					
R сж. при 20°C,	>2,20	3,75	4,38	4,26	3,56
R сж. при 50°C,	>1,00	1,47	1,31	1,45	1,34
R сж. при 0°C.	<12,00	9,93	9,80	8,53	8,26
Коэффициент колееобразования, мм/1000 проходов (по ГОСТ Р 58406.2-2020)	<0,2	0,190	0,185	0,177	0,175

Увеличение содержания ПНД более чем на 17,5% в составе асфальтобетона приводит к снижению прочности асфальтобетона при высоких температурах, но повышает эластичность смеси при отрицательных. Это указывает на приоритетность использования предлагаемой технологии в условиях I-III дорожно-климатических зон.

С использованием статистического анализа «Statistica», для установления комплексного влияния ПНД (с содержанием 5% моторного масла) на физико-

механические показатели асфальтобетона проведен двухфакторный эксперимент. Трехмерные поверхности функций отклика основных показателей показаны на рисунке 4.

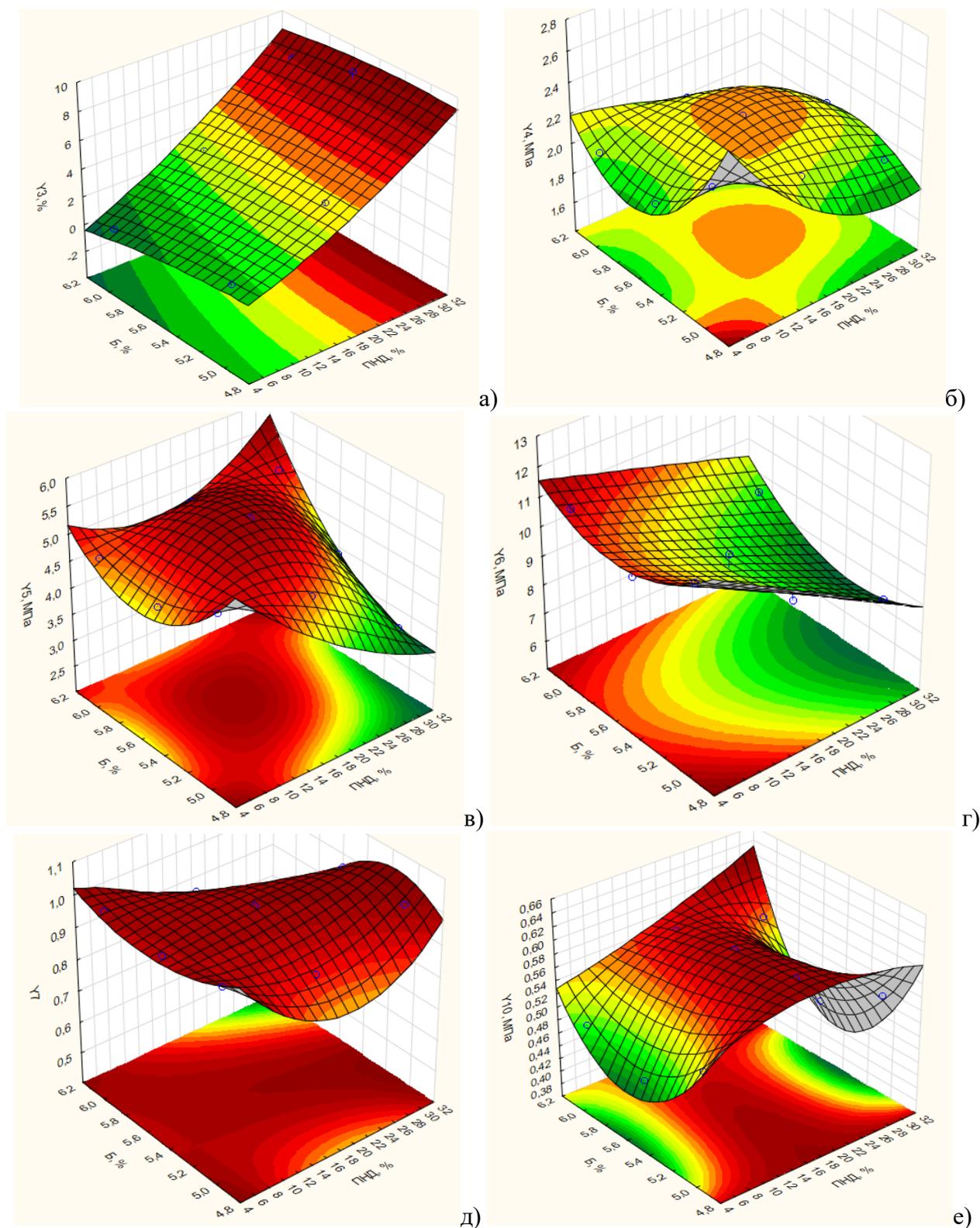


Рисунок 4 – Трехмерные поверхности функций откликов: а) водонасыщение, % (требование ГОСТ 9128-2013 от 2 до 5%); б) предел прочности при сжатии $R_{сж} 50C^0$, МПа ($> 1,0$ МПа); в) $R_{сж} 20C^0$, МПа ($> 2,5$ МПа); г) $R_{сж} 0C^0$, МПа ($< 11,0$ МПа); д) коэффициент водостойкости. ($> 0,9$); е) сдвигоустойчивость при температуре 50^0C , МПа ($> 0,25$).

Фактор X_1 - процентное содержание ПНД ($X_1=17,5\pm 12,5\%$), фактор X_2 - процентное содержание битума ($X_2=5,5\pm 0,5$). По результатам исследований получены уравнения регрессии и построены математические модели основных физико-механических показателей асфальтобетона. Для установления оптимальных значений ПНД и битума, использованы трехмерные поверхности, диаграммы Парето и рассеивания.

По совокупности изменений показателей, установлено, что оптимальное содержание ПНД находится в пределах от 16 до 18%, для битума - от 5,5 до 5,8%. Сравнительная оценка показателей асфальтобетона с оптимальным содержанием ПНД и битума с контрольными образцами (асфальтобетон без ПНД) показала, что значение предела прочности при температурах 20°C и 50°C возрастает в 1,5 и 1,3 раза соответственно. При температуре 0°C данный показатель снижается в 1,1 раза, что указывает на хорошую работоспособность покрытия при отрицательных температурах окружающей среды. Показатель сдвигоустойчивости асфальтобетона с ПНД возрастает в 1,4 раза. Использование ПНД в составе асфальтобетонной смеси позволяет снизить среднюю плотность асфальтобетона (на 4,8 %), что позволяет снизить удельный вес дорожной одежды и, как следствие, нагрузку на дорожные сооружения. Дополнительно снижается стоимость асфальтобетона.

Для исследования влияния ПНД на процесс деградации структуры асфальтобетона во времени, использован метод ускоренного старения асфальтобетонной смеси, в целом, что дает более полное представление о роли частиц ПНД в составе асфальтобетона. Исследование показало, что прочностные показатели образца с ПНД изменились от 10% до 24%, у образца без ПНД изменение составило от 17% до 48%. Это согласуется с результатами анализа термограмм и указывает на повышенную термостабильность асфальтобетона с ПНД и повышенное время эффективной эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Оптимальный состав асфальтобетонной смеси зависит от соотношения минеральных компонентов (щебня, песка, минерального порошка, высевок). Рекомендован следующий оптимальный состав асфальтобетонной смеси, удовлетворяющий требования ГОСТ 9128-2013: щебень (фракция 10-20 (10-25) мм) – 38-48%; отсев дробления (0-5 мм) – 30-39%; минеральный порошок 3-5%; ПНД загрязненный моторным маслом до 15%) – 16-18 % от массы битума; битум БНД 90/130 (БНД 70/100) – 5,5-5,8 % (свыше 100% минеральной части). В лабораторных условиях установлен наиболее эффективный порядок смешивания компонентов асфальтобетонной смеси, при использовании в ее составе ПНД. Порядок загрузки смесителя: щебень → песок → ПНД → минеральный порошок → сухое перемешивание → битум → мокрое перемешивание → готовая смесь. Такая очередность смешивания сырьевых материалов позволяет на 15-20% снизить время смешивания и повышает однородность асфальтобетонной смеси. В виду того, что верхний слой

асфальтобетонного покрытия подвергается износному воздействию шин автомобилей, для предотвращения попадания микропластика в ОС, предложено использовать

данный асфальтобетон в нижних слоях

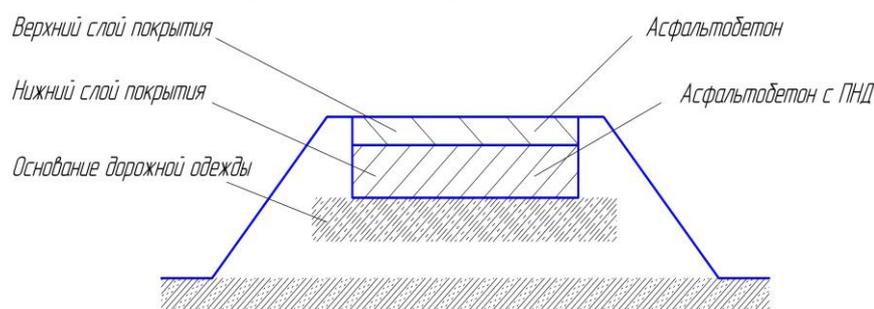


Рисунок 5 - Поперечный профиль дорожной одежды

асфальтобетонного покрытия для II, III и IV дорожно-климатической зоны строительства, рисунок 5.

Для получения асфальтобетона с ПНД, загрязненного моторным маслом, разработана технологическая схема с использованием оборудования обычного асфальтобетонного завода. Дополнительно устанавливается бункер с дозатором для ПНД. Для реализации способа утилизации отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, разработаны технологические регламенты получения асфальтобетонных смесей типов А и Б марок I и II, которые приняты и одобрены профильными предприятиями.

В пятой главе представлена оценка геоэкологической устойчивости асфальтобетона, оптимального компонентного состава с добавлением ПНД, загрязненного моторным маслом. Выполнен экономический анализ технологии производства асфальтобетона с оптимальным содержанием измельченной тары, загрязненной моторным маслом.

Геоэкологическая устойчивость полученного асфальтобетона оценивалась по величине эмиссии нефтепродуктов из образцов в водные среды и по воздействию на биологические объекты. Токсикологические, санитарно-химические исследования характеристик асфальтобетонов с ПНД (содержание 17,5 %), загрязненного моторным маслом (15% от массы ПНД), проведены с использованием методик МУ 2.1.674-97. Анализировались вытяжки получены при pH=4,8 (ацетатно-аммонийный буферный раствор) и pH=6,9 (дистиллированная вода). Содержание нефтепродуктов в водной среде при размещении в ней образцов асфальтобетона с ПНД, загрязненный моторным маслом, представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Содержание нефтепродуктов, мг/дм³

Образец	10 суток	20 суток	30 суток	60 суток	ПДК*
Асфальтобетон без ПНД, pH=6,9	<0,02	0,04	0,05	0,05	0,3
Асфальтобетон с ПНД, pH=6,9	<0,03	0,05	0,06	0,06	
Асфальтобетон без ПНД, pH=4,8	<0,03	0,06	0,08	0,08	
Асфальтобетон с ПНД, pH=4,8	<0,04	0,07	0,09	0,09	

Исследование показало, что содержание нефтепродуктов в водной вытяжке из асфальтобетона с ПНД загрязненным моторным маслом не превышает ПДК* для нефтепродуктов (согласно СанПиН 1.2.3685-21) и ПДК качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года № 552)

Для проведения анализа биотестирования (определение токсичности асфальтобетона) образцов асфальтобетона с ПНД, загрязненного моторным маслом, использовано два тест-объекта: водоросли – *Scenedesmus quadricauda* (Turp) Breb., и ракообразные – *Daphnia magna* Straus по ФР. 1.39.2007.03222 и ФР. 1.39.2007.03223. Результаты исследований представлены в таблице 6 и 7.

Таблица 6 – Оценка острой токсичности с помощью *Scenedesmus quadricauda*

№	Концентрация водной вытяжки из асфальтобетона с ПНД, %	Кратность разбавления	Отклонение от контроля (I, %)	Оценка токсичности
1	100	1	-29,0	не оказывает
2	50	2	-7,5	не оказывает
3	10	10	6,7	не оказывает
4	1	100	8,8	не оказывает

Таблица 7 – Оценка острой токсичности с помощью *Daphnia magna Straus*

№	Концентрация водной вытяжки из асфальтобетона с ПНД, %	Кратность разбавления	Отклонение от контроля (I, %)	Оценка токсичности
1	100	1	10	не оказывает
2	50	2	0	не оказывает
3	10	10	0	не оказывает
4	1	100	0	не оказывает

Неразбавленная водная вытяжка из образца асфальтобетона с ПНД и моторным маслом не оказывает острого токсического действия ИКР₅₀₋₇₂=0, БКР₂₀₋₇₂=1.

Установлено ЛКР₅₀₋₉₆=0, БКР₁₀₋₉₆ = 1. Отсюда следует, что, при контакте с водными средами, асфальтобетон с ПНД и моторным маслом не оказывает острого токсического воздействия на тест-объекты.

На основании проведенных исследований доказано, что при использовании измельченной тары из ПНД (17,5% от массы битума), загрязненной моторным маслом (15% от массы битума), в составе асфальтобетона, возможно получение асфальтобетона, отвечающего требованиям геоэкологической безопасности. Его экологическая безопасность обеспечивается за счет размещения ПНД и моторного масла в структуре асфальтобетона, вовлечения углеводородов моторного масла в процессы структурообразования асфальтобетона с созданием долговременных, прочных связей с битумом.

При производстве асфальтобетонной смеси (тип А, I марки) с применением ПНД и моторного масла, экономия денежных средств на производство 1 т асфальтобетонной смеси составит 231 руб. (6-8% от стоимости, в ценах 2023г.), по сравнению с традиционным составом. Дополнительно будет исключен платеж за размещение использованной тары из ПНД на полигоне (в 2022г. в Пермском крае составляет 6593,29 руб./т).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что в утилизируемой таре из ПНД, используемой для транспортировки и временного хранения моторного масла, малого объема (1 л) содержится моторного масла в 10 раз больше, чем в таре большого объема (30 л) на 1000 кг утилизируемой тары. В 1 тонне утилизируемой тары может содержаться от 1,5 до 15,1 % остатков моторного масла. Токсикометрический анализ результатов биотестирования ПНД, загрязненного моторным маслом (1,5; 5; 15% от массы ПНД), показал, что безвредная кратность разбавления водной вытяжки для *Scenedesmus quadricauda* – 1; 1; 2, для *Daphnia magna Straus* – 5,06; 68,25; 250,25, соответственно. Установлено, что измельченная тара из ПНД, с содержанием остатков моторного масла не более 7,5%, относится к 4 классу опасности для окружающей природной среды, что позволяет ее использовать в качестве сырьевого ресурса.

2. ПНД загрязненный моторным маслом используется в структуре асфальтобетона в качестве комплексного модификатора, который позволяет повысить физико-механические показатели асфальтобетона и снизить эмиссию углеводородов битума в атмосферный воздух.

3. Измельченную тару из ПНД возможно использовать в качестве компонента асфальтобетона без удаления из нее остатков моторного масла. Установлен оптимальный состав асфальтобетона с ПНД и моторным маслом: щебень – 45-48%, песок – 11-14%, отсев дробления – 35-39%, ПНД – 17,5%, битум БНД 90/130 – 5,4-5,8 % (свыше 100% смеси). Доказано, что при содержании ПНД 17,5%, улучшаются характеристики

асфальтобетона: значение предела прочности при температурах 20°C и 50°C возрастает в 1,5 и 1,3 раза, соответственно. При температуре 0°C данный показатель снижается в 1,1 раза, что указывает на хорошую работоспособность покрытия при отрицательных температурах окружающей среды. Показатель сдвигоустойчивости возрастает в 1,4 раза. Использование ПНД в составе асфальтобетонной смеси позволяет снизить среднюю плотность асфальтобетона на 4,8 %.

4. Исследование токсикологических свойств асфальтобетона с ПНД (17,5%), содержащим моторное масло (15%), показало отсутствие недопустимого воздействия на ОС.

5. При производстве асфальтобетонной смеси с ПНД наиболее эффективный порядок смешивания компонентов представляет собой: щебень → песок → ПНД → минеральный порошок → сухое перемешивание → битум → мокрое перемешивание. Такая последовательность загрузки смесителя позволяет снизить на 15-20% время смешивания компонентов асфальтобетона и способствует повышению ее однородности.

6. Производство 1000 т асфальтобетона с использованием отработанной тары из ПНД позволяет сэкономить денежные средства в размере 231 тыс. руб. (в ценах 2023г) Эффективность разработанного способа утилизации отработанной тары достигается за счет: ресурсосбережения природных сырьевых материалов; исключения размещения ПНД и моторного масла в ОС.

7. Разработанный способ утилизации отходов тары из ПНД, загрязненной моторным маслом, позволяет: вовлечь отходы в ресурсный цикл производства геоэкологически устойчивого, способного к рециркулированию продукта; реализовать ресурсосберегающую технологию производства асфальтобетона, отвечающую принципам экономики замкнутого цикла; снизить техногенное воздействие на ОС за счет снижения формирования вторичного потока загрязняющих веществ.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Асфальтобетон с ПНД предлагается использовать в нижних слоях асфальтобетонного покрытия, который не подвергается истирающему воздействию шин, что позволит предотвратить образование микропластика. Одним из дальнейших перспективных направлений исследования ресурсного потенциала отходов ПНД является изучение возможности их использования для получения других композиционных материалов, используемых для строительства. Использование высокой устойчивости полимеров к внешним воздействиям ОС позволяет разрабатывать ресурсо- энергосберегающие технологии получения строительных материалов обладающих геоэкологической устойчивостью на всем протяжении своего жизненного цикла.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним:

1. The use of polymer materials in the composition of asphalt concrete / Pugin K.G., Yakontseva O.V., **Salakhova V.K.**, Burgonutdinov A.M. // Materials Research Proceedings. – 2022. – Vol. 21 – P. 150-155. (**Scopus**)

2. Pugin K.G., **Pugina V.K.** (**Salakhova V.K.**) The use of waste in the composition of organic-mineral mixtures used in road construction // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1926 – 012059. (**Scopus**)

3. **Пугина В.К.** (**Салахова В.К.**) Мировой опыт использования пластиковых отходов при создании асфальтобетонной смеси. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 2 (277). – С. 35 - 37 (**Chemical Abstracts**)

4. **Салахова В.К.**, Рудакова Л.В., Пугин К.Г. Оценка влияния полиэтилена низкого давления на процесс старения асфальтобетона // Управление техносферой: электрон. журнал. – 2023. – Т.6. Вып. 2. – С. 142 – 157. (Перечень ВАК)

5. **Салахова В.К.**, Рудакова Л.В., Пугин К.Г. Оценка эмиссии нефтепродуктов при утилизации загрязненной тары из полиэтилена // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. –2023. – Т. 31. – №2. – С. 270 – 277. (Перечень ВАК)

6. **Салахова В.К.**, Пугин К.Г. Технологическая схема производства асфальтобетонной смеси с добавлением отходов полиэтилена низкого давления // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 3(278). – С. 37-40. (Chemical Abstracts).

Патент:

7. Патент № 2799927 С1 Российская Федерация, МПК С04В 26/26, Е01С 7/22. Асфальтобетон: № 2023103148 : заявл. 13.02.2023 : опубл. 14.07.2023 / К.Г. Пугин, Л.В. Рудакова, Я.И. Вайсман, **Салахова В.К.** [и др.].

Прочие работы по теме диссертации:

8. **Салахова В.К.**, Рудакова Л.В. Анализ методов обращения с пластиковыми отходами // Химия. Экология. Урбанистика. – 2022. – Т. 1. – С. 107-111

9. **Пугина В.К. (Салахова В.К.)**, Рудакова Л.В. Критерии выбора групп полимерных отходов для использования в качестве сырьевого компонента в производстве асфальтобетона// Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. –Т. 1. – С. 38-42.

10. **Салахова В.К.**, Рудакова Л.В., Коротаяев В.Н. Геоэкологическая опасность тары для моторного масла из полиэтилена // Химия. Экология. Урбанистика. – 2023. – Т. 1. – С. 188-193.