

УДК 625.85.06

Бушуева Виктория Александровна, студентка кафедры ХТПНГ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

Фатхутдинова Ильсия Мирсалиховна, студентка кафедры ХТПНГ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

Вагапов Булат Рустемович, кандидат химических наук, доцент кафедры ХТПНГ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

МОДИФИКАЦИЯ НЕФТЯНОГО ДОРОЖНОГО БИТУМА РЕЗИНОВОЙ КРОШКОЙ, АКТИВИРОВАННОЙ ПЕРЕКИСЬЮ ВОДОРОДА

Аннотация. Одной из проблем загрязнения окружающей среды является утилизация использованных автомобильных покрышек. Ежегодно их количество растет. Свозят автомобильные шины в места захоронения – полигоны. Но, к сожалению, они биологически неразлагаемы, а продукты их сжигания канцерогенны по воздействию на организм человека. Одним из направлений использования отработанной резины является использование ее в качестве модификатора битумных материалов. В статье рассматривается метод улучшения характеристик битумного вяжущего, входящего в состав асфальтобетона, путем добавления стирол-бутадиен-стирольного каучука и резиновой крошки, активированной перекисью водорода.

Abstract. At the moment, one of the problems of environmental pollution is the recycling of used car tires. Their number is growing every year. Car tires are taken to landfill sites. But, unfortunately, they are biologically indegradable, and the products of their combustion are carcinogenic in their effects on the human body. Using a crumb rubber as a modifier of asphalt binders is one of the ways to reduce it. The article discusses a method for improving the characteristics of asphalt binders,

which are part of asphalt concrete, by adding styrene-butadiene-styrene polymer and crumb rubber activated with hydrogen peroxide.

Ключевые слова: битум, СБС-полимер, резиновая крошка, модификация, утилизация, активация

Keywords: bitumen, SBS polymer, crumb rubber, modification, recycling, activation

Введение

Российская Федерация – самая большая страна по площади занимаемой территории (17,1 млн км²). По данным Росстата протяженность автомобильных дорог на 2023 год составляет более 1,5 млн км. Большая часть этих дорог, кроме дорог местного значения, имеет асфальтобетонное покрытие. Одним из компонентов асфальтобетонной смеси (АБС) является битум нефтяной дорожный.

На данный момент нефтяные битумы, производимые на нефтеперерабатывающих заводах, не справляются с современным уровнем грузонапряженности [13]. Они имеют небольшой температурный интервал эксплуатации, низкую эластичность, склонны к атмосферному старению [13, 16]. Для улучшения свойств нефтяных битумов применяют различные модификаторы [10].

Полимерные модификаторы, применяемые для модификации нефтяных дорожных битумов, принято делить на несколько групп [16, 17]:

1. каучукоподобные полимеры. К ним относят резиновую крошку, латексы и пр.;
2. термоэластопластичные полимеры. К ним относят стирол-бутадиен-стирол (СБС) и этилен-винил-ацетат (ЭВА);
3. термореактивные пластмассы. К ним относят эпоксидные, полиэфирные и пр. синтетические смолы;
4. термопластичные пластмассы. К ним относят полипропилен, полиэтилен, полистирол и пр.;

5. также отдельно выделяют полимерную серу.

Одна из современных тенденций в области модификации нефтяных битумов – использование вторичных полимеров и отходов нефтехимической промышленности и автомобильных шин [1-6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 18-20].

Не менее важной проблемой для многих стран, в том числе Российской Федерации, является утилизация использованных автомобильных покрышек [16]. Ежегодно объем производства автомобилей возрастает, а вместе с ним и объем производства автомобильных шин. На данный момент наиболее частым способом утилизации шин является захоронение на свалках, что приводит к накоплению отходов. Это экологическая и экономическая катастрофа, потому что автомобильные шины биологически не разлагаемые и выделяют опасные вещества, особенно при сжигании [11].

Как уже было написано выше, использование измельченной резиновой крошки в модификации нефтяных битумов может стать решением данной проблемы. В России на данный момент резина применяется в качестве наполнителя в асфальтобетонной смеси и битумном вяжущем «сухим» или «мокрым» способом.

Для реализации в полной степени потенциала резиновой крошки как модификатора возможно получение однородного резинобитумного вяжущего. Это позволит утилизировать автомобильные шины, снизив воздействие на окружающую среду, использовать резиновую крошку совместно с другими модификаторами, которые могут быть дорогостоящими, например, блоксополимер стирол-бутадиен-стирол, что уменьшит себестоимость готового битумного вяжущего. Также, в отличие от СБС-полимера, резиновая крошка под воздействием ультрафиолета и озона, устойчива к атмосферному старению [13, 16].

Методы и материалы

В процессе получения резинобитумного битумного вяжущего, применялись следующие основные компоненты: битум нефтяной дорожный

вязкий, резиновая крошка автомобильных шин, масло-пластификатор и блоксополимер типа стирол-бутадиен-стирол.

Битум нефтяной дорожный

В качестве исходного компонента использовался битум нефтяной дорожный производства ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» марки БНД 100/130. Его физико-механические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика исходного битума БНД 100/130

№ п/п	Наименование показателя	Значение	Требования ГОСТ 33133-2014
1	Глубина проникания иглы при 25°С, 0,1 мм	103	101-130
2	Температура размягчения по кольцу и шару, °С	46	не ниже 45
3	Растяжимость при 25°С, см	78	не менее 70
4	Растяжимость при 0°С, см	6	не менее 4
5	Температура хрупкости, °С	-22	не выше -20

Данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что значения показателей для БНД 100/130 соответствуют требованиям ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования».

Резиновая крошка

Измельченная резиновая крошка отработанных автомобильных шин была предоставлена ПАО «Татнефть» (г. Альметьевск, Республика Татарстан) и содержала фракцию 0,5 мм.

Масло-пластификатор

Минеральное масло ПН-6Ш представляет собой концентрат ароматических углеводородов. Термически устойчиво, по воздействию на организм человека относится к IV классу опасности, без резкого неприятного запаха с относительно невысокой плотностью. Кроме того, данный пластификатор способствует снижению вязкости модифицированных битумных вяжущих при рабочих температурах и понижает температуру

хрупкости по Фраасу конечного продукта [7]. Свойства масла-пластификатора ПН-6Ш приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-химические свойства масла-пластификатора ПН-6Ш

№ п/п	Наименование показателя	Значение по ТУ 38.1011217-89
1	Плотность при 20°C, г/см ³	0,950-0,980
2	Вязкость кинематическая при 100°C, мм ² /с	28-40
3	Показатель преломления 50°C	1,515-1,555
4	Анилиновая точка, °C	35-70
5	Температура вспышки в открытом тигле, °C	не ниже 230
6	Температура застывания, °C	не ниже 36
7	Содержание: механических примесей, % воды n-метилпирролидона, % парафино-нафтеновых углеводородов, % смола, %	отсутствие следы не ниже 0,01 не ниже 20 не ниже 8

Стирол-бутадиен-стирольный каучук

Для исследования в качестве синтетического полимерного модификатора был использован блоксополимер типа стирол-бутадиен-стирольный марки СБС Л30-01А. Характеристика физических свойств СБС-полимера представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика физических свойств СБС-полимера

№ п/п	Наименование показателя	Значение по ТУ 2294-018-00148889-2013
1	Кинематическая вязкость при 25°C, сСт, не более	9-19
2	Массовая доля связанного стирола, % масс.	28,5-31,5
3	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	700
4	Показатель текучести расплава 200°C/5 кгс, г/10 мин	<1
5	Массовая доля летучих веществ, % масс.	≤0,8
6	Массовая доля золы, % масс.	≤0,3
7	Условная прочность при растяжении, МПа	15
8	Модуль упругости при удлинении 300%, МПа	2,7
9	Твердость по Шору А за 1 сек., усл. ед.	80

Для решения поставленных задач применялись методики испытаний из ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования», ГОСТ Р 58400.1-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температурного диапазона эксплуатации» и ГОСТ Р 58400.2-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом уровней эксплуатационных транспортных нагрузок». Испытания проводились в лаборатории, предоставленной ФГБОУ ВО «КНИТУ», кафедра ХТПНГ с использованием аттестованного лабораторного оборудования, поверенных и калиброванных средств измерений.

Для моделирования в лабораторных условиях производственного процесса получения битума, модифицированного резиновой крошкой, было использовано перемешивающее устройство с мотором-редуктором и нагревательная плитка.

Обсуждение результатов

В настоящее время в России резиновая крошка в качестве модификатора асфальтобетонных смесей и битума широко не используется. На данный момент резина применяется в качестве наполнителя «сухим» и «мокрым способом». Применение резиновой крошки в модификации битумных вяжущих позволит в полной степени реализовать потенциал резиновой крошки как модификатора. Поэтому целью настоящего исследования является получение однородных резинобитумных вяжущих с введением резиновой крошки, активированной перекисью водорода и анализ их свойств.

Для выполнения этой цели был выбран двухстадийный процесс для увеличения эффективности деструкции резиновой крошки [15, 16, 21]. А для улучшения совместимости битума и резины была применена активация резиновой крошки [2].

Активация резины – это обработка ее поверхности реактивными добавками. По данным статьи [2] была выбрана перекись водорода, обладающая высокой окислительной способностью и являющаяся высокореактивной формой кислорода. Согласно данным статьи [2] активация резиновой крошки раствором чистой перекиси водорода заключается в активации поверхности частиц резины с образованием на ней карбоксильных соединений. Сначала H_2O_2 создает ионы карбония на поверхности частиц резиновой крошки, а затем преобразует эти ионы в карбоксильные соединения. Поскольку обработанные частицы содержат больше карбоксильных соединений, чем необработанные частицы, между битумом и обработанными частицами резиновой крошки происходит более интенсивное взаимодействие.

После предварительной обработки резиновой крошки получение однородного битумного вяжущего проходило в две стадии с образованием на первой стадии резинобитумного концентрата. В нем содержание резиновой крошки было выше, чем в конечном продукте. Применение концентрата как промежуточного продукта необходимо для совмещения битума и резиновой крошки, которое проходит при температуре $230^{\circ}C$ [16]. Однако, при таких высоких температурах и длительном времени перемешивания (4 часа) происходит «старение» битума, что негативно сказывается на свойствах вяжущего.

На второй стадии получали конечный образец путем компаундирования концентрата с исходным битумом в соотношении 1:1 с добавлением полимера СБС Л30-01А и масла-пластификатора в количестве 2% масс. и 1% масс. соответственно. Разбавление концентрата с получением конечного продукта проходило в течение 4 часов при температуре $175^{\circ}C$, так как при более высоких температурах происходит деструкция полимера. Пластификатор добавлялся для улучшения совместимости полимера и битума. Добавление масла-пластификатора также улучшает низкотемпературные свойства вяжущего, как это было ранее указано в предыдущем разделе.

Результаты экспериментов приведены в таблицах 4 и 5. В них отражены свойства всех образцов, полученные в ходе исследования, и свойства исходного битума БНД 100/130. Содержание СБС-полимера в образцах составляет 2% масс., масла-пластификатора – 1% масс., а содержание резиновой крошки от 0,5% масс. до 1% масс. включительно с шагом в 0,1% масс. Результаты в таблице 5 представлены по методикам испытаний ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования».

Таблица 4 – Результаты испытаний по ГОСТ 33133-2014

Наименование показателя	Наименование образца						
	БНД 100/130	БНД + РК 0,5%	БНД + РК 0,6%	БНД + РК 0,7%	БНД + РК 0,8%	БНД + РК 0,9%	БНД + РК 1%
Глубина проникания иглы при 25°С, 0,1 мм	103	63	63	61	60	59	59
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	46	61	61	62	62	63	64
Растяжимость при 25°С, см	78	76	72	69	64	62	61
Эластичность при 25°С, %	-	95	95	95	93	94	89
Растяжимость при 0°С, см	6	17	21	13	21	21	15
Эластичность при 0°С, %	-	58	58	57	57	58	57
Температура хрупкости, °С	-22	-29	-31	-26,5	-26	-27,5	-28

Результаты в таблице 5 представлены по методикам испытаний ГОСТ Р 58400.1-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температурного диапазона эксплуатации» и ГОСТ Р 58400.2-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические

условия с учетом уровней эксплуатационных транспортных нагрузок»
(устойчивость при многократных сдвиговых деформациях).

Таблица 5 - Результаты испытаний по ГОСТ Р 584001-2019 и ГОСТ Р 58400.2-2019

Наименование показателя	Наименование образца						
	БНД 100/130	БНД + РК 0,5%	БНД + РК 0,6%	БНД + РК 0,7%	БНД + РК 0,8%	БНД + РК 0,9%	БНД + РК 1%
Сдвиговая устойчивость не менее 1 кПа, при 10 рад/с, при температуре испытания, °С	64	70	76	76	76	76	76
Сдвиговая устойчивость не менее 2,2 кПа, при 10 рад/с, при температуре испытания, °С	64	76	76	76	76	76	76
Устойчивость при многократных сдвиговых деформациях типов марок S, H, V, E, J не более 75%, при температуре испытания, °С	58 тип марки Н	64 тип марки V	64 тип марки E	64 тип марки E	64 тип марки E	70 тип марки Н	70 тип марки E
Усталостная устойчивость не менее 5000 кПа, при 10 рад/с, при температуре испытания, °С	13	13	13	13	10	10	13
Температура растрескивания, °С	-29,94	-33,6	-35,62	-34,49	-36,04	-35,81	-36,65

По данным таблиц 4 и 5 можно сделать вывод, что введение в битумное вяжущее комплексной добавки, содержащей резиновую крошку и стирол-бутадиен-стирол, значительно влияет на многие показатели. По результатам таблицы 4 можно отметить, что после добавления и последующего увеличения содержания резиновой крошки в составе вяжущего снижается показатель глубины проникания иглы, что может свидетельствовать об увеличении прочности битумного вяжущего после встраивания полимерных соединений в коллоидную структуру битума. Высокотемпературные свойства битумных вяжущих значительно улучшаются после введения модификаторов, что обусловлено влиянием высокомолекулярных структур на теплостойкость вяжущего, и практически не изменяются по мере увеличения количества резиновой крошки, что, вероятно, можно судить о большем вкладе СБС-полимера в влияние на данный показатель.

Отдельно можно отметить, что теплостойкость при многократных сдвиговых деформациях возрастает при введении полимерных модификаторов, а также с увеличением количества резиновой крошки битумное вяжущее упрочняется, что можно сделать вывод из данных таблицы 5 по типам марок.

Кроме того, полимерные структуры изменяют показатель растяжимости, который уменьшается при добавлении модификаторов и снижается с повышением количества резины при 25°C, однако, при 0°C этот показатель увеличивается по сравнению исходным битумом, и, вероятно, можно заключить, что СБС-полимер и резиновая крошка способствуют более плавному снижению растяжимости при понижении температуры. А также битумные вяжущие приобретают эластичные свойства, о чем можно судить по показателю эластичности, данные которого указаны в таблице 4.

Также важно, как исследуемые модификаторы влияют на низкотемпературные свойства полученных вяжущих. Так, добавление резиновой крошки и СБС-полимера в состав вяжущего улучшает его низкотемпературные свойства, однако, увеличение количества резины в

составе не влияет на данный показатель, оставляя его на практически одинаковом уровне, что может свидетельствовать о том, резиновая крошка в вяжущем не влияет на морозостойкость.

Выводы

Введение резиновой крошки в битумное вяжущее повышает прочность высокотемпературные свойства материала, и, кроме того, эти свойства улучшаются по мере увеличения содержания резиновой крошки в составе вяжущего. Вероятно, это обусловлено девулканизацией резины при условиях приготовления резинобитумного концентрата, а также образованием карбоксильных соединений на поверхности частиц резины в процессе активации, что способствует ее вовлечению в объем битумного вяжущего. При этом резиновая крошка обладает устойчивостью к атмосферному старению.

Добавление в однородное резинобитумное вяжущее СБС-полимера приводит к улучшению тепло- и морозостойких, а также вязкостно-эластичных свойств вяжущих, что повышает показатели резинобитумного вяжущего при меньшем количестве дорогостоящего синтетического полимера.

В итоге, по результатам исследования выявлено, что модификация битумных вяжущих активированной резиновой крошкой совместно с стирол-бутадиен-стирольным полимером способствует улучшению физико-механических показателей вяжущего при меньшем количестве дорогостоящего СБС-полимера в полученном материале.

Список литературы

1. Amrita Roy, Kasilingam Rajkumar, Bharat Kargate Crumb rubber modified asphalt: fundamentals to recent developments // Asphalt materials – Recent Developments and new perspective, 2024, p. 1-16
2. Khaldoun M. Shatanawi, Szabolcs Biro, Mohammad Naser, Serji N. Amirkhanian Improving rheological properties of crumb rubber modified binder

using hydrogen peroxide // Road materials and pavement design, 2013, №3, p. 723-734

3. Sampat Kedarisetty, Krishna Prapoorna Biligiri, Jorge B. Sousa Advanced rheological characterization of reacted and activated rubber (rar) modified asphalt binders // Construction and building materials, 2016, №122, p. 12-22

4. Sara Bressi, Nicholas Fiorentini, Jiandong Huang, Massimo Losa Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: state of the art and statistics // Coatings, 2019, №9, p. 1-22

5. Sarah F. Khalaf, Rana A. Yousif, Sady A. Tayh, Abbas F. Jasim The impact of crumb rubber on the mechanical characteristics of modified asphalt mixture // ICGEE 2023, Iraq, p. 1-9

6. Wenhua Zheng, Hainian Wang, Yu Chen, Jie Ji, Zhanping You, Yuqing Zhang A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder // Construction and building materials, 2021, №297, p. 1-18

7. Абдуллин А.И. Битумные вяжущие материалы [Текст]: учебное пособие / А.И. Абдуллин, Т.Ф. Ганиева, М.Р. Идрисов, Е.А. Емельянычева, Г.К. Бикмухаметова, Р.И. Сибгатуллина – Санкт Петербург: Проспект науки, 2017.- с. 38

8. Ахмадова Х.Х., Махмудова Л.Ш., Хадисова Ж.Т., Абдулмежидова З.А. Модифицирование битумных вяжущих резиновой крошкой: аналитический обзор // Научные исследования: итоги и перспективы, 2020, №2, с. 10-28

9. Ахмадова Х.Х., Хадисова Ж.Т., Махмудова Л.Ш., Абдулмежидова З.А., Мусаева М.А. Основные способы модификации битумов различными добавками // Вестник ГГНТУ. Технические науки, 2019, №3, с. 42-56

10. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник тамбовского государственного технического университета, 2016, №2, с. 264-271

11. Вабищевич К.Ю., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хозеев Е.О. Использование отходов резины для модификации вяжущего в асфальтобетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020, №2, с.18-25

12. Вахьянов Е.М., Лукьянова М.А. Обоснование рационального состава битумных вяжущих модифицированных резиновой крошкой // VII Всероссийская научная конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая», 21-24 апреля 2015, г. Кемерово

13. Вольфсон С.И., Хакимуллин Ю.Н., Закирова Л.Ю., Хусаинов А.Д., Вольфсон И.С., Макаров Д.Б., Хозин В.Г. Модификация битумов, как способ повышения их эксплуатационных свойств // Вестник технологического университета, 2016, №17, с. 29-33

14. Иванова М.И., Емельянычева Е.А., Крыгина А.С. Модификация битумных вяжущих отходами нефтяной промышленности // Нефтяная столица, 2022, с. 218-220

15. Иванов С.А., Шабает С.Н. Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства // Вестник ТГАСУ, 2016, №4, с. 153-158

16. Иванов С.А., Шабает С.Н., Тюрюханов К.Ю. Утилизация резиновой крошки путем производства модифицированного битума // Инженерный вестник Дона, 2022, №9

17. Котенко Н.П., Щерба Ю.С., Евфорицкий А.С. Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // Технические науки, 2019, №1, с. 94-99

18. Лесик Е.И., Косицына С.С., Сафин В.А., Бурюкин Ф.А. Полимерно-битумные вяжущие, модифицированные вторичными полиолефинами и продуктами термоллиза // Южно-Сибирский научный вестник, 2023, №2, с. 139-145

19. Покладий Я.Н., Папин А.В., Иванов С.А. Химизм процесса улучшения физико-химических параметров полимерно-битумного вяжущего на основе

резиновой крошки // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2015, №4, с. 147-152

20. Хайбуллина А.А., Манянина А.Е., Вагапов Б.Р. Пластичные свойства полимерно-битумных вяжущих на основе полимеров нефтехимии // Химические проблемы современности 2020, 2020, с. 378-379

21. Шабаетв С.Н., Иванов С.А. Обоснование степени деструкции резиновой крошки в резинобитумном вяжущем // Вестник ВСГУТУ, 2019, №4, с. 89-94

References

1. Amrita Roy, Kasilingam Rajkumar, Bharat Kapgate Crumb rubber modified asphalt: fundamentals to recent developments // Asphalt materials – Recent Developments and new perspective, 2024, p. 1-16

2. Khaldoun M. Shatanawi, Szabolcs Biro, Mohammad Naser, Serji N. Amir Khanian Improving rheological properties of crumb rubber modified binder using hydrogen peroxide // Road materials and pavement design, 2013, №3, p. 723-734

3. Sampat Kedarisetty, Krishna Prapoorna Biligiri, Jorge B. Sousa Advanced rheological characterization of reacted and activated rubber (rar) modified asphalt binders // Construction and building materials, 2016, №122, p. 12-22

4. Sara Bressi, Nicholas Fiorentini, Jiandong Huang, Massimo Losa Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: state of the art and statistics // Coatings, 2019, №9, p. 1-22

5. Sarah F. Khalaf, Rana A. Yousif, Sady A. Tayh, Abbas F. Jasim The impact of crumb rubber on the mechanical characteristics of modified asphalt mixture // ICGEE 2023, Iraq, p. 1-9

6. Wenhua Zheng, Hainian Wang, Yu Chen, Jie Ji, Zhanping You, Yuqing Zhang A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder // Construction and building materials, 2021, №297, p. 1-18

7. Abdullin A.I. Bituminous binders [Text]: a textbook / A.I. Abdullin, T.F. Ganieva, M.R. Idrisov, E.A. Yemelyanycheva, G.K. Bikmukhametova, R.I. Sibgatullina – St. Petersburg: Prospect Nauki, 2017.- p. 38

8. Akhmadova Kh.K., Makhmudova L.Sh., Hadisova Zh.T., Abdulmezhidova Z.A. Modification of bitumen binders with rubber chips: an analytical review // Scientific research: results and prospects, 2020, No. 2, pp. 10-28

9. Akhmadova Kh.Kh., Hadisova Zh.T., Makhmudova L.Sh., Abdulmezhidova Z.A., Musaeva M.A. The main methods of bitumen modification with various additives // Bulletin of GGNTU. Technical Sciences, 2019, No. 3, pp. 42-56

10. Belyaev P.S., Polushkin D.L., Makeev P.V., Frolov V.A. Modification of petroleum road bitumen with polymer materials for obtaining asphalt concrete coatings with enhanced performance characteristics // Bulletin of the Tambov State Technical University, 2016, No. 2, pp. 264-271

11. Vabishevich K.Yu., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Khozeev E.O. The use of rubber waste for binder modification in asphalt concrete // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2020, No. 2, pp.18-25

12. Vakhyanov E.M., Lukyanova M.A. Substantiation of the rational composition of bitumen binders modified with rubber chips // VII All-Russian Scientific Conference of young scientists with international participation "Young Russia", April 21-24, 2015, Kemerovo

13. Wolfson S.I., Khakimullin Yu.N., Zakirova L.Yu., Khusainov A.D., Wolfson I.S., Makarov D.B., Khozin V.G. Modification of bitumen as a way to increase their operational properties // Bulletin of the Technological University, 2016, No. 17, pp. 29-33

14. Ivanova M.I., Yemelyanycheva E.A., Krygina A.S. Modification of bitumen binders by oil industry waste // Oil Capital, 2022, pp. 218-220

15. Ivanov S.A., Shabaev S.N. Investigation of the effect of the stage-by-stage technological process of obtaining composite rubber binders on their properties // Bulletin of TSASU, 2016, No. 4, pp. 153-158

16. Ivanov S.A., Shabaev S.N., Tyuryukhanov K.Yu. Utilization of rubber chips by production of modified bitumen // Engineering Bulletin of the Don, 2022, No. 9

17. Kotenko N.P., Shcherba Yu.S., Evforitsky A.S. The influence of polymer and functional additives on the properties of bitumen and asphalt concrete // Technical Sciences, 2019, No. 1, pp. 94-99

18. Lesik E.I., Kositsyna S.S., Safin V.A., Buryukin F.A. Polymer-bitumen binders modified with secondary polyolefins and thermolysis products // South Siberian Scientific Bulletin, 2023, No. 2, pp. 139-145

19. Pokladiy Ya.N., Papin A.V., Ivanov S.A. Chemistry of the process of improving the physico-chemical parameters of polymer bitumen binder based on rubber chips // Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2015, No. 4, pp. 147-152

20. Khaibullina A.A., Manyanina A.E., Vagapov B.R. Plastic properties of polymer-bitumen binders based on petrochemical polymers // Chemical problems of modernity 2020, 2020, pp. 378-379

21. Shabaev S.N., Ivanov S.A. Substantiation of the degree of destruction of rubber crumbs in a rubber-bitumen binder // Bulletin of VSGUT, 2019, No. 4, pp. 89-94