

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МОДИФИКАТОРА ДОРОЖНОГО БИТУМА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР, ИЗВЛЕЧЕННЫХ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ЭНЕРГЕТИКИ

**А. В. Таскин, Ю. С. Беляков, Д. Р. Федотов,
Р. С. Федюк, Л. А. Алексейко, О. В. Жданеев,
Д. А. Саланин, С. И. Иванников, Н. С. Вертикова**

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия;
УО «Гомельский государственный медицинский университет»,
Гомель, Республика; Беларусь;
Центр компетенций технологического развития
ТЭК ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, Москва, Россия;
ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения РАН»,
Владивосток, Россия*

Ключевые слова: алюмосиликатные микросферы; гидрофобизация; дорожный битум; модификатор; резинобитумное вяжущее.

Аннотация: Представлены результаты исследований по разработке технологических решений производства нового резинобитумного вяжущего для асфальтобетона на основе промышленных отходов: отработанных автомобильных шин, отработанного автомобильного масла и алюмосиликатных микродисперсных сфер, полученных при переработке золошлаковых

Таскин Андрей Васильевич – кандидат химических наук, заведующий лабораторией технологий использования вторичных ресурсов, директор ООО «Лаборатория прикладных исследований»; Беляков Юрий Сергеевич – научный сотрудник лаборатории технологий использования вторичных ресурсов; Федотов Демьян Романович – научный сотрудник лаборатории технологий использования вторичных ресурсов; Федюк Роман Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор Военного учебного центра, e-mail: roman44@yandex.ru, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия; Алексейко Леонид Николаевич – доктор химических наук, профессор кафедры биологической химии, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Республика Беларусь; Жданеев Олег Валерьевич – кандидат физико-математических наук, руководитель Центра компетенций технологического развития ТЭК ФГБУ «РЭА» при Министерстве энергетики Российской Федерации, Москва, Россия; Саланин Денис Алексеевич – руководитель Регионального центра нормативно-технической поддержки инноваций, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»; Иванников Сергей Игоревич – кандидат химических наук, научный сотрудник, лаборатория сорбционных процессов, ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения РАН»; Вертикова Наталья Сергеевна – магистрант, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

отходов тепловых электростанций. Предложенные технологические решения позволяют получать высококачественные полимерные добавки для модификации свойств дорожных битумов. Полученный модификатор апробирован в реальных условиях и подтвердил высокие эксплуатационные характеристики при производстве асфальта с заданными свойствами для регионов с различным климатом.

Введение

Битум является важной органической составляющей асфальтобетонных смесей, применяемых для строительства покрытий автомобильных дорог. Его использование в качестве вяжущего материала обусловлено доступностью, как крупнотоннажного отхода нефтепереработки, а также способностью обеспечивать сцепление минеральных компонентов смеси для повышения эксплуатационных характеристик дорожной одежды. Вместе с тем нефтяные битумы имеют ряд существенных технологических недостатков: относительно низкие адгезионные свойства и отсутствие эластичности, что негативно отражается на качестве и долговечности дорожных покрытий, особенно с учетом климатических условий и возрастающей интенсивности движения [1, 2].

Анализ работ российских и зарубежных исследователей [3 – 15] показывает, что повышение качества и долговечности асфальтобетонных покрытий возможно при использовании модифицированных нефтяных битумов, имеющих высокие адгезионные, прочностные и деформационные характеристики.

Наиболее распространенными разновидностями таких модифицирующих добавок являются некоторые виды высокомолекулярных соединений – эластомеры, термопласты, термоэластопласты. Битумные вяжущие с использованием полимеров широко используются на территории стран Евросоюза. Так, в Германии и Франции в дорожном строительстве применяется полимербитумные вяжущие с применением термоэластопластов типа СБС, их доля на рынке модификаторов достигает 40 %. В Чехии и Словакии также успешно применяется подобный тип вяжущих, например, чешская компания Parnato использует термоэластопласты СБС марки Carifex. Кроме этого, в качестве модифицирующей добавки в битум используются этиленвинилацетатные сополимеры Motoplast-65, а также полиэтилен и пропилен (компания Appolobit, Словакия). В Италии в модифицированном нефтяном битуме используются, как правило, эластомеры (по типу PR-PLAST) и атактический полипропилен. Компания Shell производит модификатор Kraton D, который также используется в Российской Федерации. Однако применение модифицирующих добавок сдерживается по ряду причин: сложность технологического процесса; относительно высокая стоимость производства; нестабильность качества исходного вяжущего, негативно влияющая на конечный продукт [16].

Альтернативным техническим решением, по отношению к полимербитумам, является применение резиновой крошки в качестве добавки

в дорожные битумные смеси. Приоритет ее использования в составе асфальтобетонов обеспечивается практически неограниченным запасом сырья, получаемого при переработке отработанных автомобильных шин; одновременным решением задач как ресурсосбережения, так и улучшения экологической ситуации; сравнительно невысокой стоимостью [17]. Внесение резиновой крошки в состав битумной смеси возможно «сухим» и «мокрым» способами. Первый считается устаревшим и заключается в добавлении крошки в виде минерального порошка. Более прогрессивными являются «мокрые» технологии, при которых крошка вводится в битум либо в химически модифицированном виде в присутствии определенных реагентов, например, окиси свинца и цинка, либо термомеханическим способом с предварительной девулканизацией резиновой крошки и последующим перемешиванием смеси при высокой температуре. В результате образуется резиновяжущая смесь, обладающая высокой эластичностью и широким эксплуатационным диапазоном [18].

Класс крупности резиновой крошки, используемой в России и за рубежом для модифицирования дорожных битумов, существенно различается. Так, в технологиях УНИРЕМ используется фракция до 0,9 мм, БИТРЭК – до 3 мм, БРК-ИГУ – 5...7 мм. В Европе, в основном, используется резиновая крошка крупностью 1,25...2,0 мм. В отношении использования более мелких фракций резиновой крошки (менее 1 мм) мнения специалистов разнятся: исследования показывают как положительные, так и отрицательные результаты влияния добавки такой крупности на качество конечного композита [19 – 22].

В ряде зарубежных стран (США, страны Евросоюза, Южная Америка и др.) вопросам повышения качества дорожного полотна на основе нефтяных битумов, модифицированных резиновой крошкой, посвящено значительное число исследований [23 – 27]. Успешный практический опыт применения резиновой крошки при строительстве и ремонте автомобильных дорог демонстрирует в своей работе ряд западных компаний, например, Viafrance (Франция), Massenza (Италия), Crafrko (США) [28].

Интересен опыт НПО «Инфотех» по использованию технологии БИТРЭК, подтвердивший преимущество «мокрого» метода. Но и данное решение имеет ряд недостатков, связанных с невозможностью длительного хранения и повторного разогрева модифицированного битума, что географически ограничивает применение данного состава; наличием неоднородных включений в составе получаемого битума, что приводит к засорению распыляющих форсунок на асфальтобетонных заводах (АБЗ); а также относительно высокой изначальной стоимостью полученного модифицированного битума, что ограничивает массовое применение. Несмотря на это данная технология нашла широкое применение. Так, около 15 млн кв. м верхних слоев покрытий улиц и магистралей в Москве и около 0,5 млн кв. м в городах Московской области и других регионах было отремонтировано резиноасфальтобетонами различных типов на вяжущем БИТРЭК. Выполнено дорожное покрытие ряда мостов, в том числе Автозаводского моста ТТК, Хлебниковского моста через Клязьминское водохранилище (входит в систему канала им. Москвы) и Октябрьского моста через Волгу в центре Ярославля. В 2012 году проведен осмотр участка дороги Р-112 в районе населенного пункта Растовцы (Талдомский район Московской области),

где летом 1998 года проведена укладка смеси типа Б-1 на вяжущем БИТРЭК. Комиссионно установлено, что после 14 лет эксплуатации дороги участок находится в хорошем состоянии. Присутствуют повреждения в виде температурных трещин с минимальным раскрытием (менее 1 см). Ровность покрытия отвечает требованиям СНиП. При этом интенсивность движения превышает норматив дороги III технической категории в среднем в 2–3 раза. Технологические исследования НПО «Инфотех» в последнее время были направлены на поиск оптимального соотношения битум/резина, позволяющего в максимальной мере использовать свойства каучуков и, с другой стороны, не допустить усложнений в технологии укладки асфальтобетонных смесей (АБС), согласно нормативам по ГОСТ 9128–2013. При добавлении модификатора до 30 % взамен равной части битума, прочность образцов при 20 °С увеличивалась и достигла 4,0 МПа. При дальнейшем увеличении доли модификатора повышалась пористость асфальтобетонных образцов, что приводило к снижению прочности. Испытания проводились на АБС марки Б2, протестированной по ГОСТ 22245–90 (табл. 1).

При увеличении содержания модификатора в вяжущем более 30 % значительно повышается вязкость АБС, что не обеспечивает нормального уплотнения при формировании образцов, и, соответственно, повышает пористость и снижает прочность.

Кроме вышеизложенного, использование модификаторов на основе резиновой крошки сопряжено не только с проблемами удорожания битума вследствие необходимости получения крошки существенно небольших фракций при механическом измельчении изношенных шин, но и со сложностью достижения эффективного смешения резиновой крошки с битумом для получения, выдержанного по качеству (в первую очередь по показателю эластичности) резинобитумного вяжущего.

Таким образом, обсуждаемая научно-технологическая задача сохраняет свою актуальность, что обуславливает необходимость продолжения исследований.

Таблица 1

Характеристики составного вяжущего (по данным НПО «Инфотех»)

Характеристики	Соотношение битум/модификатор					
	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50
Прочность, МПа:						
при 0 °С	11,3	11,0	10,3	8,1	8,2	8,2
при 20 °С	2,4	2,7	3,4	4,0	3,8	3,2
при 50 °С	1,3	1,4	1,6	1,8	1,7	1,7
Водостойкость, ед.	0,86	0,87	0,88	0,88	0,86	0,86
Пористость, %	17	16	16	15	17	19
Пенетрация, 0,1 мм:						
при 25 °С	102	110	119	125	130	137
при 0 °С	32	36	68	90	100	111
Температура хрупкости, °С	–18	–22	–25	–28	–29	–30

Методы и материалы

Новизной и особенностью исследования является впервые примененное в разработанном модификаторе МД-01 сочетание трех компонентов: отработанного машинного масла; укрупненной фракции резиновой крошки, получаемой при утилизации использованных автомобильных шин; микросфер алюмосиликатов, извлекаемых из золошлаковых отходов (ЗШО) твердотопливных электрических станций. Поскольку все компоненты являются продуктами переработки отходов, одновременно решается также актуальная экологическая проблема снижения уровня загрязнения окружающей среды.

Технологические процессы обрабатывались на экспериментальном стенде в лаборатории разработки технологий использования вторичных ресурсов Политехнического института Дальневосточного федерального университета (ДФУ) в соответствии с общей схемой (рис. 1).

Основные элементы технологической схемы:

- механическое измельчение покрышек для получения резиновой крошки класса крупности 5...8 мм (фракция такой крупности применена впервые, что не только упрощает технологический процесс, но и приводит к существенному удешевлению производства модификатора);

- удаление металлического или текстильного корда;

- перемешивание резиновой крошки с отработанным автомобильным маслом и легкоплавким битумом в емкости с обогревом в течение 3 ч при заданной температуре для девулканизации резины;

- измельчение нагретой смеси на дисковом истирателе для получения тонкодисперсного девулканизата резины;

- использование алюмосиликатных сфер при получении гранулированного модификатора длительного хранения (применение данного компонента при получении модификатора является авторской новизной технологического подхода).

При подборе микродисперсной добавки в жидкий модификатор опробованы известковая мука, активированный минеральный порошок, применяемый при производстве цемента, и алюмосиликатные микродисперсные сферы (АМС) (рис. 2), полученные при разработке технологии комплексной переработки ЗШО, образующихся при сжигании угля на тепловых электрических станциях. По сравнению с другими наполнителями микросферы оказались предпочтительнее по таким характеристикам, как равномерность гранулометрического состава, пластичность смеси, стоимость и дефицитность на местном рынке.

Одновременно решалась проблема по увеличению объемов использования АМС. Опробованы два вида микросфер – сухие (см. рис. 2, а) и гидрофобизированные (см. рис. 2, б).

Гидрофобизация микросфер проводилась на специальной установке в горячих газах тяжелых углеводородов. После обработки газами углеводородов микросферы перемешивались с жидким модификатором равномерно по всему объему за более короткое время и без образования непропитанных



Рис. 1. Технологическая схема получения модификатора МД-01

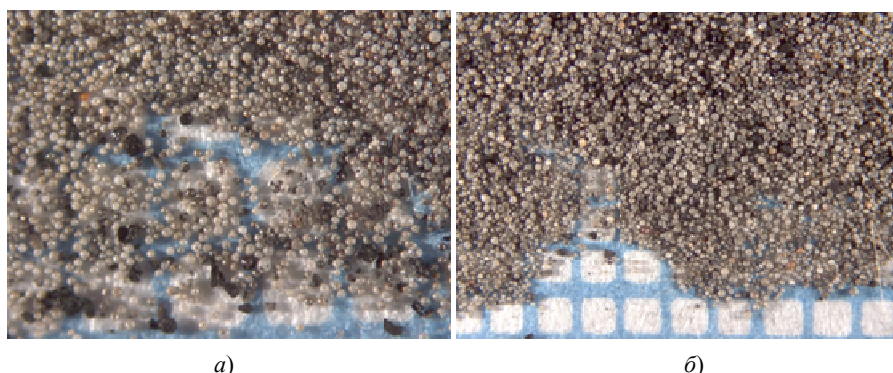


Рис. 2. Микросферы класса крупности 0,071...0,1 мм:
а – сухие, *б* – гидрофобизированные

модификатором гранул. Дополнительно было опробовано использование гидрофобизированных АМС в качестве микродисперсного наполнителя в асфальте.

Получены предварительные положительные результаты по снижению расхода битума и улучшению характеристик асфальта в сравнении с применением при его производстве известковой муки, активированного минерального порошка и цемента.

Для исключения введения модификатора в исходный битум, применяемого на АБЗ, предложена технология внесения его непосредственно в смеситель завода. Для этого получаемый модификатор гранулируется

с добавлением мелкодисперстных алюмосиликатов, полученных из золотвалов ТЭЦ. С одной стороны, они снижают слеживаемость гранул, а с другой, являются частью минерального порошка, вводимого в асфальтобетонную смесь. Опытным путем подобрано оптимальное количество минерального порошка, необходимое для выполнения всех предъявляемых к нему требований.

Слеживаемость гранул проверялась следующим образом: трубочка с площадью сечения 1,75 кв. см фиксировалась в вертикальном положении на подставке. Модификатор засыпался примерно 3 см по высоте, вставлялся поршень с площадкой сверху и пригружался до общей массы 0,5 кг. Таким образом, создавалось давление 2,85 м водяного столба. Вся конструкция выдерживалась 24 ч при температуре 25 °С. При вынимании испытываемого модификатора из трубочки гранулы могут слипаться, но при легком нажатии они должны рассыпаться. Если гранулы рассыпались по отдельности, считается, что слеживаемость удовлетворительная. Данный тест показывает, что модификатор в биг-бэгах может храниться в штабеле в 2 яруса.

Благодаря получению модификатора в гранулированном виде отпадает необходимость долгого хранения его в горячем виде, что положительно сказывается на сохранении свойств битума. Также в случае использования гранулированного материала значительно увеличивается география использования.

Для исключения неоднородностей и полного раскрытия свойств каучуков, в отличие от применяемой НПО «Инфотех» технологии введения мелкой резины в битум, нами предложена методика первичного разогрева резиновой крошки в среде битума и предварительная девулканизация с дальнейшим истиранием в дисковой мельнице. В результате затраты на гомогенизацию резины в битуме значительно снижаются, так как появляется возможность использовать крошку с различным размерным рядом. Предварительное измельчение необходимо для удаления металлокорда и исключения попадания его в мельницу. Максимальный размер резиновых частиц ограничивается пропускными отверстиями трубопроводов и зазором в мельнице. Использование крупных резиновых частиц позволяет значительно снизить затраты на измельчение.

Описанные выше технологические приемы позволяют в сумме достичь себестоимости модификатора ниже стоимости битума. Повышение эксплуатационных характеристик получаемого асфальтобетона позволяет рассчитывать на повышенный спрос на данный модификатор. При этом проводится полная утилизация отработанных автошин (без вторичного получения резиновых отходов, как при производстве спортивных покрытий), то есть решается экологическая проблема.

Для решения задачи измельчения девулканизированной резиновой крошки в среде горячего битума была разработана установка, позволяющая разогревать резинобитумную смесь до рабочей температуры в 240 °С и подачу ее в мельницу для дальнейшего измельчения. Схема приведена на рис. 3 и является составной частью технологического процесса.



Рис. 3. Схема установки измельчения девулканизированной резиновой крошки

Результаты и обсуждения

На рисунке 4 представлена фотография изготовленного гранулированного битумного модификатора МД-01. Такой модификатор можно хранить до полугода (испытанный в лаборатории срок) без потери технологических характеристик, а также перевозить на значительные расстояния и формировать производственные запасы при дорожных работах.

В таблице 2 приведены результаты применения модификатора, в сравнении с характеристиками широко распространенного в Российской Федерации дорожного нефтяного битума марки БНД 90/130 (используется для регионов с холодным климатом), при его добавлении в состав смеси в объеме до 30 % взамен равной части битума.

По представленным в табл. 2 результатам можно выделить улучшение следующих показателей битума (в сравнении с БНД 90/130):

- повышение температуры размягчения на 18 %;
- повышение температуры хрупкости более чем на 60 %;
- повышение эластичности резинобитумного вяжущего на порядок (в 10 раз);
- уменьшения шумности на 50 %;
- уменьшение колееобразования более чем на 80 %;
- возрастание прочности получаемого асфальта на 20 %.



Рис. 4. Гранулированный модификатор битума МД-01

Таблица 2

**Стоимостные и физико-механические показатели
дорожного нефтяного битума, модифицированного добавкой МД-01**

Показатели	БНД 90/130 (исходный)*	0,7 БНД 90/130 + + модификатор**
Стоимость вяжущего, р./кг	25	16
Температура размягчения, °С	45	55
Температура хрупкости, °С	–18	–30
Эластичность, %	0,5	50
Шумность, дБ	40	20
Колееобразование, мм	30	5
Прочность асфальта при 20 °С, МПа	25	30

* Битум нефтяной дорожный с пенетрацией от 9 до 13 мм с использованием специальной калиброванной иглы.

** Смесь битума и модификатора в пропорции 70 на 30 %.

Межремонтный интервал дорожного покрытия при этом увеличился в 2 раза. Кроме того, достигалось снижение стоимости вяжущего с модификатором МД-01 на 30 – 36 % по сравнению с исходным битумом.

Предложенная технология позволяет создавать модификаторы битумов для регионов с различным климатом за счет варьирования доли модификатора и его компонентов в смеси с битумом. Увеличение доли битума позволяет повысить температуру размягчения, повысить прочность, обеспечить стабильную работу дорожного полотна при высоких температурах. Увеличение доли резины повышает пластичность, адгезию и вязкость, а также расширяет температурный диапазон. Увеличение доли масел понижает вязкость, повышает пластичность и обеспечивает стабильную работу дорожного полотна при низких температурах.

Для проверки свойств модификатора в реальных условиях была изготовлена опытная установка для производства модификатора МД-01, производительностью 300 кг в сутки. В 2018 г. осуществлена экспериментальная укладка 300 м² холодной асфальтобетонной смеси, изготовленной с использованием модификатора при ремонте проездов вдоль жилого дома в г. Владивостоке. Обследование в январе 2023 г. технического состояния уложенного асфальта показало, что покрытие не имеет трещин и выбоин и находится в отличном состоянии, что свидетельствует о правильно выбранных пропорциях при приготовлении вяжущего и о хороших эксплуатационных свойствах покрытия.

Заключение

Разработана технология получения универсального модификатора дорожных битумов (МД-01), имеющего характеристики, сравнимые с полимербитумом, применяемого для любых дорожных битумов и увеличи-

вающего срок службы дорожного покрытия в два раза без увеличения себестоимости асфальта.

Впервые использовано сочетание трех компонентов в составе модификатора: крупнофракционная резиновая крошка (является приоритетным техническим решением исследовательской группы ДВФУ), позволяющая упростить технологический процесс получения модификатора и удешевить его производство; отработанное машинное масло и алюмосиликатные микросферы, извлекаемые при переработке ЗШО теплоэнергетики.

Полученный модификатор апробирован в реальных условиях и подтвердил высокие эксплуатационные характеристики при производстве асфальта с заданными свойствами для регионов с различным климатом. Все сырьевые компоненты являются промышленными и бытовыми отходами, что позволяет одновременно решить экологическую задачу по снижению загрязнения окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Старт – 1». Договор № 4895ГС1/83515 по теме: «Исследование и разработка технологических решений по извлечению ценных компонентов из золошлаковых отходов углесжигающих электростанций, разработка и изготовление модулей экспериментальных установок» в рамках реализации проекта «Разработка технологии производства геополимерных (бесцементных), в том числе композиционных, вяжущих материалов на основе техногенных отходов предприятий ТЭК, производства строительных материалов и изделий на геополимерах и композиционных вяжущих».

Список литературы

1. The Effect of Crumb Rubber on the Physical and Rheological Properties of Modified Binder / S. K. A. Bakar, M. E. Abdullah, M. M. Kamal [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1049, No. 1. – P. 012099. doi: 10.1088/1742-6596/1049/1/012099
2. Беляев, П. С. К вопросу получения резино-битумного концентрата для асфальтобетонных дорожных покрытий из изношенных автомобильных шин / П. С. Беляев, М. В. Забавников, О. Г. Маликов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, №. 2. – С. 346 – 352.
3. Sindu, B. S. Evaluation of Mechanical Characteristics of Nano Modified Epoxy Based Polymers Using Molecular Dynamics / B. S. Sindu, S. Saptarshi // Computational Materials Science. – 2015. – Vol. 96. – P. 146 – 158. doi: 10.1016/j.commatsci.2014.09.003
4. Fire Retardancy Enhancement of Unsaturated Polyester Polymer Resin Filled with Nano and Micro Particulate Oxide Additives / M. C. S. Ribeiro, S. P. B. Sousa, P. R. O. Nóvoa [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 58, No. 1. – P. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/58/1/012020
5. Ferro, G. New Cementitious Composite Building Material with Enhanced Toughness / G. Ferro, J. M. Tulliani, A. Lopez, P. Jagdale // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2015. – Vol. 76. – P. 67 – 74. doi: 10.1016/j.tafmec.2015.01.005

6. Airey, G. D. Fundamental Binder and Practical Mixture Evaluation of Polymer Modified Bituminous Materials / G. D. Airey // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2004. – Vol. 5, No. 3. – P. 137 – 151. doi: 10.1080/10298430412331314146
7. Cortizo, M. S. Effect of the Thermal Degradation of SBS Copolymers During the Ageing of Modified Asphalts / M. S. Cortizo, D. O. Larsen, H. Bianchetto, J. L. Alessandrini // *Polymer Degradation and Stability*. – 2004. – Vol. 86, No. 2. – P. 275 – 282. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.006
8. Goodrich, J. L. Asphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties (with Discussion) / J. L. Goodrich // *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. – 1991. – Vol. 60. – P. 83 – 89.
9. Isacson, U. Laboratory Investigation of Polymer Modified Bitumens / U. Isacson, X. Lu // *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*. – 1999. – Vol. 68. – P. 1 – 35.
10. Lu, X. Chemical and Rheological Evaluation of Ageing Properties of SBS Polymer Modified Bitumens / X. Lu, U. Isacson // *Fuel*. – 1998. – Vol. 77, No. 9-10. – P. 961 – 972.
11. Traxler, R. N. Durability of Asphalt Cements / R. N. Traxler // *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technology*. – 1963. – Vol. 32. – P. 44 – 63.
12. Brûlé, B. Association bitumes-polymères: Relations entre la composition, la structure et les propriétés / B. Brûlé, Y. Brion // *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. – 1986. – Vol. 145. – P. 45 – 52.
13. Choquet, F. S. The Determination of SBS, EVA and APP Polymers in Modified Bitumens / F. S. Choquet, E. J. Ista // In book: *Polymer Modified Asphalt Binders* (Wardlaw K. R., Shuler S. (Eds.)). – Philadelphia, PA, USA : American Society for Testing and Materials International, 1992. – P. 35 – 49.
14. Duhovny, G. S. Asphalt Concrete Modified by Rubber Crumbs in Transport Construction / G. S. Duhovny, A. V. Karpenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 327, No. 3. – P. 032019. doi: 10.1088/1757-899X/327/3/032019
15. Improving Energy Efficiency of Bitumen Modification with Reclaimed Crumb Rubber / V. P. Belyaev, O. G. Malikov, S. A. Merkulov [et al.] // *Components of Scientific and Technological Progress*. – 2013. – Vol. 1, No. 16. – P. 75 – 77.
16. Котляревский, А. А. Асфальтобетонные смеси на основе модифицированного битумного вяжущего. – Текст : электронный / А. А. Котляревский, И. В. Незамаева // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – Т. 45, № 2 (45). – 12 с. URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29911811_31361215.pdf (дата обращения: 17.10.2023).
17. Христофорова, А. А. Механоактивационный способ обработки измельченных вулканизаторов. – Текст : электронный / А. А. Христофорова, М. Д. Соколова // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2009. – Vol. 17, No. 4. – P. 435 – 438. URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12834036_68749062.pdf (дата обращения: 17.10.2023).
18. Марьев, В. А. Ресурсосбережение при строительстве и ремонте дорожных асфальтобетонных покрытий за счет эффективного использования резиновой крошки / В. А. Марьев, Ж. В. Перлина, А. В. Руденский, Б. М. Слепая // *Дороги и мосты*. – 2015. – № 1 (33). – С. 334 – 344.

19. СТО 61595504-002–2010. Материал композиционный «УНИРЕМ-001» на основе активного резинового порошка. Технические условия. – Текст : электронный. – Введ. 2011-03-28. – Подольск, 2010. – 30 с. URL : https://rosavtodor.gov.ru/storage/b/2014/03/25/1395772879_172624_8.pdf (дата обращения: 17.10.2023).
20. СТО 58528024.001–2013. Композиционные битумные вяжущие БИТРЭК. Технические условия. – Текст : электронный. – Введ. 2013-12-01. – М., 2013. – 17 с. URL : https://rosavtodor.gov.ru/storage/b/2015/01/20/sto_58528024_001_2013.pdf (дата обращения: 17.10.2023).
21. Щербаков, Е. Резиновые крошки. Переработка отработанных автошин остаётся уделом инициативного малого бизнеса – Текст : электронный // Сибирский энергетик : сетевой журнал. – 2011. URL : <https://www.vsp.ru/2011/07/08/rezinovye-kroshki/> (дата обращения: 01.10.2023)
22. Иванов, С. А. Перспективы получения резино-битумных вяжущих для повышения долговечности автомобильных дорог / С. А. Иванов // Молодой ученый. – 2013. – № 3. – С. 60 – 62.
23. Influence of the Chemical Composition and the Morphology of Crumb Rubbers on the Rheological and Self-Healing Properties of Bitumen / G. Liu, Y. Liang, H. Chen [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 210(1). – P. 555 – 563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.205
24. Development and Performance Evaluation of Crumb Rubber–Bio-Oil Modified Hot Mix Asphalt for Sustainable Highway Pavements / A. E. Modupe, O. D. Atoyebi, A. O. Basorun [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2019. – Vol. 10, No. 2. – P. 273 – 287.
25. Bilema, M. A. M. Investigating the Rheological and Physical Properties for Unaged of Crumb Rubber-Modified Binders Containing Warm Mix Asphalt Additive / M. A. M. Bilema, M. Y. Aman, K. A. Ahmad // GCEC 2017: Global Civil Engineering Conference. – 2019. – P. 1389 – 1400. doi: 10.1007/978-981-10-8016-6_100
26. Loderer, C. Effect of Crumb Rubber Production Technology on Performance of Modified Bitumen / C. Loderer, M. N. Partl, L. D. Poulikakos // Construction and Building Materials. – 2018. – No. 191. – P. 1159 – 1171. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.046
27. Blażejowski, K. Effect of Recycled Rubber on the Properties of Road Bitumen / K. Blażejowski, B. Gawdzik, T. Matynia // Journal of Chemistry. – 2018. – No. 9-10. – P. 1 – 6. doi:10.1155/2018/8759549
28. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, М. В. Забавников, А. Р. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 63 – 69.

References

1. Bakar S.K.A., Abdullah M.E., Kamal M.M., Abd Rahman R., Buhari R., Jaya R.P., Ahmad, K.A. The effect of crumb rubber on the physical and rheological properties of modified binder, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1049, no. 1, pp. 012099. doi: 10.1088/1742-6596/1049/1/012099
2. Belyaev P.S., Zabavnikov M.V., Malikov, O.G. [To the question of obtaining the rubber-bitumen concentrate for asphalt-concrete road surfaces from the worn-out automobile tires], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 346-352. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Sindu B.S., Saptarshi S. Evaluation of mechanical characteristics of nano modified epoxy based polymers using molecular dynamics, *Computational materials science*, 2015, vol. 96, pp. 146-158. doi: 10.1016/j.commatsci.2014.09.003
4. Ribeiro M.C.S., Sousa S.P.B., Nóvoa P.R.O., Pereira C.M., Ferreira A.J.M. Fire retardancy enhancement of unsaturated polyester polymer resin filled with nano and micro particulate oxide additives, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 58, no. 1, pp. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/58/1/012020
5. Ferro G., Tulliani J.M., Lopez A., Jagdale P. New cementitious composite building material with enhanced toughness, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2015, vol. 76, pp. 67-74. doi: 10.1016/j.tafmec.2015.01.005
6. Airey G.D. Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials, *International Journal of Pavement Engineering*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 137-151. doi: 10.1080/10298430412331314146
7. Cortizo M.S., Larsen D.O., Bianchetto H., Alessandrini J.L. Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts, *Polymer Degradation and Stability*, 2004, vol. 86, no. 2, pp. 275-282. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.006
8. Goodrich J.L. Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties (with discussion), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1991, vol. 60, pp. 83-89.
9. Isacsson U., Lu X. Laboratory investigation of polymer modified bitumens, *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*, 1999, vol. 68, pp. 1-35.
10. Lu X., Isacsson U. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens, *Fuel*, 1998, vol. 77, no. 9-10, pp. 961-972.
11. Traxler R.N. Durability of asphalt cements, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technology*, 1963, vol. 32, pp. 44-63.
12. Brûlé B., Brion Y. Association bitumes-polymères: Relations entre la composition, la structure et les propriétés, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1986, vol. 145, pp. 45-52.
13. Choquet F.S., Ista E.J. The determination of SBS, EVA and APP polymers in modified bitumens, In book: Wardlaw K. R., Shuler S. (Eds.). *Polymer modified asphalt binders*. Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials International, 1992, pp. 35-49.
14. Duhovny G.S., Karpenko A.V. Asphalt concrete modified by rubber crumbs in transport construction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, no. 3, pp. 032019. doi: 10.1088/1757-899X/327/3/032019
15. Belyaev V.P., Malikov O.G., Merkulov S.A., Belyaev P.S., Polushkin D.L., Frolov V.A. Improving energy efficiency of bitumen modification with reclaimed crumb rubber, *Components of Scientific and Technological Progress*, 2013, vol. 1, no. 16, pp. 75-77.
16. Kotlyarevskiy A.A., Nezamaeva I.V. [Asphalt concrete mixtures based on modified bituminous binder], *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, vol. 45, no. 2 (45), 12 p. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29911811_31361215.pdf (accessed 17 October 2023) (In Russ., abstract in Eng.)

17. Khristoforova A.A., Sokolova M.D. [Mechanoactivation Treatment of Ground Vulcanizates], *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2009, vol. 17, no. 4, pp. 429-432. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12834036_68749062.pdf (accessed 17 October 2023) (In Russ., abstract in Eng.)
18. Maryev V.A., Perlina J.V., Rudensky A.V., Blind B.M. [Resource conservation in the construction and repair of road asphalt pavements due to the effective use of crumb rubber], *Dorogi i mosty* [Roads and bridges], 2015, vol. 1(33), pp. 334-344. (In Russ., abstract in Eng.)
19. STO 61595504-002–2010. *Material kompozitsionnyy "UNIREM-001" na osnove aktivnogo rezinovogo poroshka. Tekhnicheskiye usloviya* [Composite material "UNIREM-001" on the basis of active rubber powder. Technical conditions], Podol'sk, 2010, 30 p. available at: https://rosavtodor.gov.ru/storage/b/2014/03/25/1395772879_172624_8.pdf (accessed 17 October 2023) (In Russ.)
20. STO 58528024.001–2013. *Kompozitsionnyye bitumnyye vyazhushchiye BITREK. Tekhnicheskiye usloviya* [Composite bituminous binders BITREK. Technical conditions], Moscow, 2013, 17 p. available at: https://rosavtodor.gov.ru/storage/b/2015/01/20/sto_58528024_001_2013.pdf (accessed 17 October 2023) (In Russ.)
21. Shcherbakov Ye. [Rubber crumbs. Recycling of used tires remains the lot of proactive small businesses], *Sibirskiy energetik: setevoy zhurnal* [Siberian Energy: online magazine], 2011. available at: <https://www.vsp.ru/2011/07/08/rezinovye-kroshki/> (accessed 17 October 2023) (In Russ.)
22. Ivanov S.A. [Prospects of rubber-bitumen binders for improving the durability of highways], *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2013. no. 3, pp. 60-62. (In Russ., abstract in Eng.)
23. Liu G., Liang Y., Chen H., Wang H., Komacka J., Gu X. Influence of the chemical composition and the morphology of crumb rubbers on the rheological and self-healing properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 210(1), pp. 555-563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.205
24. Modupe A.E., Atoyebi O.D., Basorun A.O., Gana A.J., Ramonu J.A., Raphael O.D. Development and performance evaluation of crumb rubber–Bio-oil modified hot mix asphalt for sustainable highway pavements, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 273-287.
25. Bilema M.A.M., Aman M.Y., Ahmad K.A. Investigating the rheological and physical properties for unaged of crumb rubber-modified binders containing warm mix asphalt additive, *GCEC 2017: Proceedings of the 1st Global Civil Engineering Conference*, 2019, pp. 1389-1400. doi: 10.1007/978-981-10-8016-6_100
26. Loderer C., Partl M.N., Poulikakos L.D. Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 191, pp. 1159-1171. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.046
27. Blażejowski K., Gawdzik B., Matynia T. Effect of recycled rubber on the properties of road bitumen, *Journal of Chemistry*, 2018, no. 9-10, pp. 1-6. doi:10.1155/2018/8759549
28. Belyaev P.S., Malikov O.G., Zabavnikov M.V., Sokolov A.R. [Improving the quality of petroleum bitumen by modification with products of processing of worn-out automobile tires], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 1, pp. 63-69. (In Russ., abstract in Eng.)

The Technology for Production of Road Bitumen Modifier Using Aluminum Silicate Microspheres Extracted from Ash and Slag Waste of Energy Industry

A. V. Taskin, Yu. S. Belyakov, D. R. Fedotov,
R. S. Fediuk, L. A. Alekseiko, O. V. Zhdaneev,
D. A. Salanin, S. I. Ivannikov, N. S. Vertikova

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;
Gomel State Medical University, Gomel, Republic Belarus;
Competence Center for Technological Development of Fuel and Energy
Complex "REA" of the Ministry of Energy of Russia, Moskva, Russia;
Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the RAS,
Vladivostok, Russia*

Keywords: aluminosilicate microspheres; hydrophobization; road bitumen; modifier; rubber bitumen binder.

Abstract: The results of the research on the development of technological solutions for the production of a new rubber-bitumen binder for asphalt concrete based on industrial waste: used tires, used automobile oil and aluminosilicate microdispersed spheres obtained from the processing of ash and slag waste (ASW) of thermal power plants are presented. The proposed technological solutions make it possible to produce high-quality polymer additives for modifying the properties of road bitumen. The novelty of the developed approach lies in the use of micro-sized hydrophobized aluminosilicate spheres to obtain a granular modifier, which are released as an additional product during the complex processing of aluminosilicate. The positive economic efficiency of technological solutions is ensured by the use of large rubber crumbs (more than 8 mm) or crumb rubber, their devulcanization together with hydrocarbon fractions of used motor oil and petroleum bitumen at a given temperature until a gel-like mass is formed, which is subsequently subjected to mechanical grinding in a mill. The resulting modifier was tested in real conditions and confirmed high performance characteristics in the production of asphalt with specified properties for regions with different climates.

© А. В. Таскин, Ю. С. Беляков, Д. Р. Федотов,
Р. С. Федюк, Л. А. Алексейко, О. В. Жданеев,
Д. А. Саланин, С. И. Иванников, Н. С. Вертикова, 2023