

Обзорная статья

УДК 665.775

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-267-273>

CC BY 4.0

Влияние наноструктурного модификатора из автомобильных покрышек на потребительские свойства битума

Александр Анатольевич Кетов^{1*} , Марина Павловна Красновских^{1,2} , Елена Васильевна Калинина¹ ,
Вадим Григорьевич Офрихтер¹ , Даниил Андреевич Татьянников¹ 

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: alexander_ketov@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Крекинг резины отработанных покрышек совместно с органическими растворителями приводит к девулканизации резины и диспергированию материала до наноразмерных частиц. Процесс может быть осуществлен в проточном реакторе. Полученные наномодификаторы совместимы с битумом и предсказуемо изменяют технические характеристики битумного вяжущего. Предложены различные практические решения по использованию полученных модифицированных битумных вяжущих в дорожном строительстве и для укрепления грунтов. **Методы и материалы.** Предложено использовать метод совместного с органическими растворителями крекинга резины для получения наноструктурного модификатора битума. Полученный наноструктурный модификатор исследован методами анализа размеров наночастиц и растворимости в толуоле. Для битумных вяжущих, полученных с применением наномодификаторов, определены стандартные для битумов характеристики, такие как глубина проникновения иглы, температура размягчения, температура хрупкости и растяжимость. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что в ходе предложенного процесса образуется наноструктурный модификатор, совместимый с битумом. Показано, что добавление наномодификатора к битуму позволяет направленно изменять свойства получаемого битумного вяжущего, улучшает потребительские свойства битумного вяжущего и расширяет области его применения. Предлагается применить полученный продукт для гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений в составе гидроизоляционных мастик. **Заключение.** Совместный с органическими растворителями крекинг резины в проточном реакторе позволяет получить наноструктурный модификатор, совместимый с битумом. Полученный продукт обладает улучшенными свойствами в сравнении с исходным битумом, что расширяет область его применения. Предлагается применение полученного продукта для изготовления гидроизоляционных мастик. Предложенные технические решения позволяют снизить экологическую нагрузку отходов автомобильных покрышек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноструктурный модификатор, битум, автомобильные покрышки.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кетов А.А., Красновских М.П., Калинина Е.В., Офрихтер В.Г., Татьянников Д.А. Влияние наноструктурного модификатора из автомобильных покрышек на потребительские свойства битума // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 267–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-267-273>. – EDN: FVJYXA.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация и выбор подходящих материалов для конкретных применений долгое время были главными целями инженеров по обработке материалов и проектированию по всему миру. Битумы, модифицированные полимерами, не являются ис-

ключением. Исследования показали, что добавление полимеров к битуму с целью получения бинарных [1] или многокомпонентных смесей [2] может улучшить конечные свойства модифицированных битумов, обеспечивая материалы с улучшенными свойствами для применений, где чистый битум сам по себе не будет работать должным образом.

© Кетов А.А., Красновских М.П., Калинина Е.В., Офрихтер В.Г., Татьянников Д.А., 2023

Вопрос использования наномодификаторов битумов для производства асфальтобетона в конечном счете обусловлен экономической целесообразностью [3]. С одной стороны, при стоимости модификатора выше стоимости битума замена части битума модификатором является экономически необоснованной. Но, с другой стороны, результатом воздействия наномодификаторов обычно является повышение технических и эксплуатационных свойств асфальтобетона.

Поэтому использование резиновой крошки, получаемой из отработанных покрышек для производства наномодификаторов битума, имеет не только экономический, но и экологический эффект. Так, известный модификатор «Унирем» получают в роторном диспергаторе, при этом происходит не только измельчение материала, но и частичная девулканизация резины [4, 5]. В общем случае повышение температуры и удельной поверхности резиновой крошки при синтезе модифицированного битума ведет к частичному разложению резиновой крошки в асфальтобетонной матрице и улучшению потребительских характеристик продукта [6].

Направленный химический синтез наномодификаторов представляется более перспективным вследствие невысоких удельных механических затрат и возможности высокой производительности. Закрепителю битума класса дициандиаминов при различных соотношениях придает модифицированному продукту эластичность и повышенную устойчивость к размягчению при увеличении температуры и обладает полимерно-вязущими свойствами, обеспечивающими высокое сцепление с основой дорожного покрытия и стойкостью к агрессивным климатическим условиям за счет образования нанодисперсной структуры битума типа «золь-гель» [7].

Использование термохимической обработки под давлением резины отработанных покрышек в присутствии кислородсодержащего масла позволяет получить наноструктурированный продукт, совместимый с битумом для дальнейшего использования полученного модификатора в производстве асфальтобетона [8]. Предложенный метод переработки отработанных покрышек позволяет снизить экологическую нагрузку на окружающую среду вследствие безопасной утилизации покрышек и отсутствия опасных выбросов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве резины отработанных покрышек использовали резиновую крошку фракции 1–3 мм производства ООО «Буматика».

Размер образующихся частиц определяли анализатором Zetasizer Nano фирмы Malvern (Великобритания).

Совместимость полученных продуктов с битумом определяли по растворимости в толуоле согласно ГОСТ 20739-75. «Битумы нефтяные. Метод определения растворимости».

Характеристики полученных битумных вяжущих определяли по стандартным методикам: температуру размягчения – методом «Кольцо и Шар» по ГОСТ 33142-2014; определение глубины проникания иглы – по ГОСТ 33136-2014; определение температуры хрупкости по Фраасу – по ГОСТ 33143-2014 и определение растяжимости – по ГОСТ 33138-2014. Для проведения анализов использовали оборудование: прибор КиШ 20-2200 (изготовитель: Infra Test Pruftechnik GmbH, Brackenheim, Germany); электропечь низкотемпературная лабораторная SNOL 58/350 (производитель: АВ «Амега», Литва); автоматический пенетрометр (изготовитель: Infra Test Pruftechnik GmbH, Brackenheim, Germany); аппарат автоматический для определения температуры хрупкости нефтебитумов (изготовитель: АО БСКБ «НЕФТЕХИМАВТОМАТИКА»); дуктилометр (изготовитель: Infra Test Pruftechnik GmbH, Brackenheim, Germany); термометр контактный цифровой ТК-5.06.

Для осуществления процесса была изготовлена установка, представляющая собой последовательно соединенные горизонтально расположенные одношнековый экструдер и трубчатый реактор, работающие в проточном режиме. Экструдер и реактор снабжены независимыми электропечами. Применяли два типа органических растворителей. Кислородсодержащим растворителем было выбрано подсолнечное нерафинированное масло марки «Благо», бескислородным растворителем – мазут топочный малозольный по ГОСТ 10585-2013.

Условия синтеза модификаторов приведены в табл. 1.

Во всех случаях время пребывания в экструдере реакционной массы составляло 15 минут, в реакторе – 45 минут.

Для приготовления образцов модифицированного битума использовали битум с показателями, определенными по ГОСТ 22245-90 и представленными в табл. 2.

Оптимизация состава и свойств смеси может быть достигнута с помощью экспериментального процесса проектирования смеси. Доказано [9], что такого рода процедуры полезны для установления взаимосвязей между типом модификаторов полимеров и ожидаемыми свойствами модифицированного битума. Сущность метода заключается в определении функций отклика, характеризующих свойства битумов, от параметров синтеза добавки. Предполагается стандартное содержание добавки в 20 масс. %.

Таблица 1

Условия синтеза модификаторов

№ п/п	Органический растворитель	Доля растворителя в композиции с резиной, масс.%	Температура экструдера, °С	Температура реактора, °С
М1	Растительное масло	33	300	400
М2	Растительное масло	18	300	400
М3	Мазут	33	300	380
М4	Мазут	33	300	400

Таблица 2

Характеристики исходного битума и требования по ГОСТ к БНД 60/90 и БНД 40/60

Наименование показателей	Исследованный битум нефтяной дорожный БНД	Требования по ГОСТ 22245-90 к БНД 60/90	Требования по ГОСТ 22245-90 к БНД 40/60
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм, при температуре 25°С, мм	55	61–90 не менее 20	40–60 не менее 13
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	50	не ниже 47	не ниже 51
Растяжимость не менее, при температуре 0°С, см	3,9	не менее 3,5	не нормируется
Температура хрупкости, °С	–20	не выше –15	не выше –12

Условия синтеза наноструктурированного битумного продукта

Для приготовления наноструктурированного битумного продукта модификатор в количестве 20 масс.% добавляли при перемешивании в битум при температуре 220°С и выдерживали при перемешивании в течение 30 минут. В результате получено четыре образца наноструктурированного битумного продукта (НСБП), имеющих далее соответствующие обозначения НСБП-1 – НСБП-4.

Условия синтеза НСБП-мастики

Для проверки применимости предложенного направления использования полученного НСБП была приготовлена и нанесена на бетонное основание НСБП-мастика. Мастика была изготовлена на основе известково-глинистой эмульсионной пасты состава: НСБП-4 – 50%; глина – 7%; известь – 7%; вода – 36%. Глина и известь были смешаны в сухом виде в соотношении 1:1, а затем в сухую известково-глиняную смесь (эмульгатор) при постоянном перемешивании постепенно добавлялось требуемое количество нагретой воды до достижения смесью консистенции густой сметаны. Время приготовления пасты составило 2 мин. Перемешивание компонентов осуществлялось электромиксером. НСБП-мастика была приготовлена путем перемешивания готовой эмульсионной пасты и нагретой НСБП. НСБП добавлялась в смесь известково-глинистого эмульгатора

с водой постепенно, до загустевания смеси, затем добавлялась вода, и операция повторялась до полной загрузки компонентов эмульсионной пасты. Время приготовления мастики составило 5 мин.

Для проверки применимости предложенного направления использования полученного НСБП была приготовлена и нанесена на бетонное основание НСБП-мастика. Мастика была изготовлена на основе известково-глинистой эмульсионной пасты. С целью улучшения сцепления НСБП-мастики бетонное основание перед нанесением гидроизоляционного состава было огрунтовано праймером из смеси НСБП с бензином. После нанесения праймера поверхность была полностью просушена. Готовность поверхности к нанесению мастики была проконтролирована чистой белой салфеткой, на которой не осталось следов после приложения ее к огрунтованной поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения совместимости модификаторов с битумом исследовали растворимость модификаторов в толуоле. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Исходя из вышеописанных предположений о кинетике полимерных молекул и девулканизации трехмерной структуры резины, можно предположить, что непрерывная трехмерная структура резины разрушается в ходе термохимического воздействия до частиц молекулярного и коллоидного размера. Эти предпо-

Таблица 3

Растворимость модификаторов битума в толуоле

Образец	Доля вещества, нерастворимого в толуоле, масс. %
M1	45,12
M2	28,21
M3	21,13
M4	33,63

ложения были подтверждены определением размера частиц в растворе толуола. Кривые распределения размеров частиц в растворах образцов модификатора представлены на рис. 1.

Очевидно, что термохимическая обработка приводит к глубокому крекингу полимерной композиции резины, в результате чего не только разрушается трехмерная структура вулканизированной резины, но и происходит образование преимущественно низкомолекулярных соединений, растворимых в толуоле. Нерастворимые в толуоле компоненты композиции представляют собой наноразмерные частицы размером менее 1 мкм с преимущественными размерами 200–800 нм. Нерастворимая в толуоле часть модификатора по своему химическому строению может представлять собой как неорганические добавки в исходной композиции, такие как сажа, оксиды кремния и магния, так и остатки резины, в которых при вулканизации образовалась наиболее устойчивая трехмерная структура. При любом из этих вариантов нерастворимые в толуоле, а значит и в битуме частицы представляют собой гете-

рогенные включения коллоидного типа и не могут препятствовать смешению модификатора с битумом и созданию однородной композиции.

Для проверки этого предположения были изготовлены модифицированные битумы и определены их основные потребительские характеристики. Результаты представлены в табл. 4 в сравнении с изменениями свойств по отношению к исходному битуму.

Для сравнения свойств модификаторов с необработанной резиновой крошкой был дополнительно приготовлен образец с 20 масс.% резиновой крошки в исходном битуме по стандартной для модификаторов методике. Однако определить основные характеристики полученного модифицированного резиновой крошкой битума по ГОСТ 22245-90 оказалось невозможно: при нагреве пробы вяжущего до 160°C однородного жидкого состояния не было достигнуто, также не представлялось возможным профильтровать пробу через сито 0,7 мм. Таким образом, очевидно, что резиновая крошка в исходном виде не может рассматриваться как модификатор битумов.

По уровню термохимического воздействия описываемый метод превосходит известный метод высокотемпературного сдвигового измельчения [10, 11], при котором доказана диффузия ароматических углеводородов из битумной составляющей в частицы модификаторов, а соединений серы – из частиц модификаторов в битум. Поэтому предложенный метод термохимического крекинга приводит к усилению таких видов взаимной диффузии и созданию более однородной композиции. Следует отметить, что именно плохая растворимость полимерных модификаторов в битумной матрице считается основным недостатком большинства полимерных добавок [12].

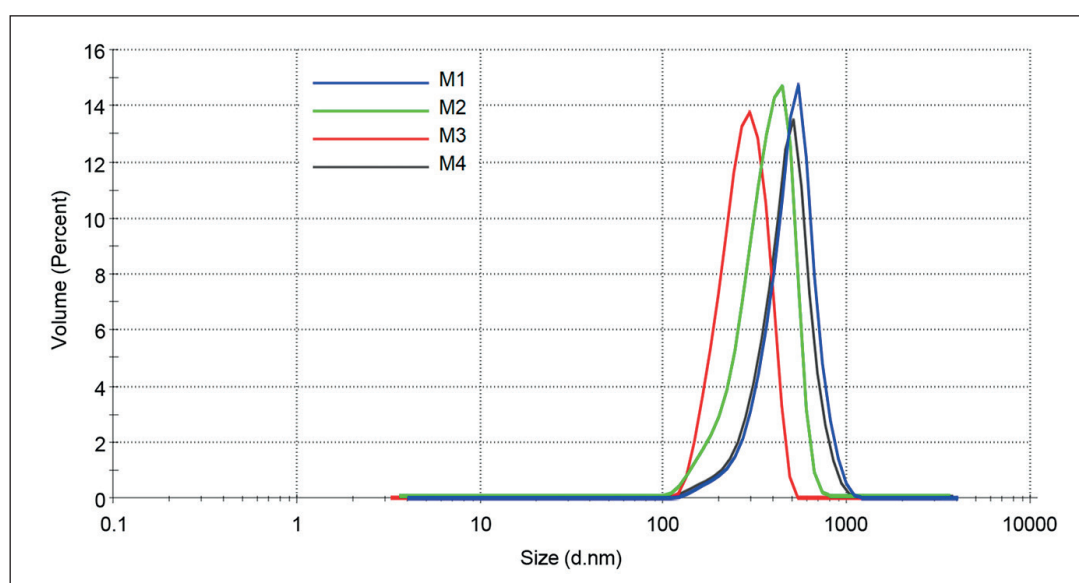


Рис. 1. Кривые распределения размеров частиц в растворах образцов модификатора

Таблица 4

Характеристики модифицированных битумов по ГОСТ в сравнении с соответствующими характеристиками исходного битума

Показатель	МБ1 (по отношению к исходному битуму)	МБ2 (по отношению к исходному битуму)	МБ3 (по отношению к исходному битуму)	МБ4 (по отношению к исходному битуму)
Глубина проникания иглы 0,1 мм при 25°C, мм	41 (–14)	191 (+136)	139 (+84)	152 (+97)
Температура размягчения по кольцу и шару, °C	36 (–14)	43 (–7)	47 (–3)	44 (–6)
Растяжимость при 0°C, см	11,6 (+7,7)	10,5 (+6,6)	9,8 (+5,9)	10,1 (+6,2)
Температура хрупкости, °C,	–31 (–11)	–26 (–6)	–26 (–6)	–29 (–9)

Поэтому снятие этого ограничения можно однозначно характеризовать как важное преимущество предлагаемого метода.

Для исследованных модификаторов битума наиболее очевидным выводом является факт, что все полученные модификаторы улучшают потребительские свойства битума. Действительно, для исследований применяли битум, который по глубине проникновения иглы формально не удовлетворяет требованиям ни к БНД 60/90, ни к БНД 40/60. При этом три из четырех модификаторов резко улучшают вязкие свойства битума, увеличивая значение глубины проникновения иглы в два и более раз.

Аналогично происходит улучшение показателей растяжимости и температуры хрупкости. Так, в соответствии с требованиями ГОСТ 22245-90 устанавливается нижний предел по растяжимости при 0°C в 3,9 см, а применение модификаторов увеличивает этот показатель для всех образцов примерно в два раза. Для всех образцов снижается и температура хрупкости. Единственный показатель, по которому свойства модифицированных битумов незначительно ухудшаются, это температура размягчения. Вероятно, это связано с крекингом органических молекул и снижением средней молекулярной массы битумной композиции. Однако возможно применение битумов с пониженной температурой размягчения в иных областях, помимо дорожного строительства. Кроме того, известна возможность создания комплексных модификаторов с применением полимерных молекул, которые будут повышать температуру размягчения [13].

Таким образом, совместный пиролиз под давлением резиновой крошки отработанных покрышек и растительного масла приводит к получению наноструктурированного продукта, совместимого с битумом. Одним из возможных направлений использования полученного наноструктурированного битумного продукта (далее по тексту НСБП) явля-

ется его применение для гидроизоляции подземных частей зданий, сооружений и коммуникаций, а также для герметизации деформационных швов в подземных частях. Рекомендации по перспективному использованию НСБП были сформулированы с учетом [14].

Перспективным видится использование НСБП в составах асфальтовых мастик (НСБП-мастик), которые можно наносить в один или несколько слоев в виде механизированного или ручного намета на бетонные (железобетонные) или кирпичные основания, формируя пластичное штукатурное покрытие.

НСБП-мастику изготавливают из смеси НСБП-эмульсионной пасты с порошкообразным минеральным наполнителем. В качестве эмульгатора для приготовления НСБП-эмульсионной пасты могут применяться различные материалы, например, минеральный порошок, тальк, мел, глина, фосфогипс, сажа, цемент, известь [15]. При этом необходимо отметить, что наиболее предпочтительными в качестве эмульгаторов будут известковые или известково-глинистые составы. Трепел и диатомит являются низкокачественными эмульгаторами. Для приготовления НСБП-эмульсий могут быть пригодны только легко поддающиеся дроблению малосцементированные разновидности трепела и диатомита. В любом случае с использованием трепела или диатомита могут быть приготовлены лишь малоустойчивые крупнодисперсные пасты, поэтому эти эмульгаторы не рекомендуются для приготовления НСБП-эмульсионных паст. В качестве наполнителей для приготовления НСБП-мастик возможно использование известнякового или кирпичного порошков и золы-уноса ТЭЦ. Допускается применение до 10% портландцемента. Необходимо иметь в виду, что применение золы-уноса недопустимо при сульфатной агрессии грунтовых вод. Соответственно, цемент при сульфатной агрессии должен быть сульфатостойким. Вода для приготовления НСБП-эмульсионных паст и НСБП-

мастик должна быть пригодна для приготовления бетона (ГОСТ 23732-2011).

Адгезия нанесенной на бетонную поверхность НСБП-мастики была проверена испытанием на отрыв в соответствии с [14]. Испытание на отрыв было выполнено путем приложения выдергивающей нагрузки к стальной пластине 30×30 мм. Пластина была приклеена к поверхности нанесенного мастичного покрытия термопластичным клеем. В ходе испытаний на отрыв к стальной пластине было приложено выдергивающее усилие 60 Н (6,7 Н/см²), которое было выдержано в течение 180 сек, затем усилие было увеличено до 100 Н (11,1 Н/см²), после чего отрыв пластинки с мастикой произошел через 40 сек. Таким образом, адгезия НСБП-мастики к бетонному основанию соответствует требованиям, предъявляемым к асфальтовым мастикам для гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений [14].

Полученные характеристики НСБП-мастики позволяют предполагать высокие эксплуатационные характеристики, характерные для мастик с дисперсными наполнителями [16] и типичные для асфальтобетонного вяжущего [17]. Обычно наблюдаемое увеличение в устойчивости мастик к деформации, высокую жесткость и ударную вязкость связывают с возникновением стабильной наноструктуры битумной мастики [18, 19].

Полученные результаты о применимости полученного наномодифицированного битума согласуются с результатами других исследователей, доказывающих сопоставимость битумов, модифицированных продуктами переработки резиновой крошки с компаундом, изготовленным из отходов каучука [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование термохимической обработки под давлением резины отработанных покрышек позволяет в проточном реакторе производить наноструктурированный модификатор, совместимый с битумом.

Полученный наноструктурированный битумосодержащий продукт может применяться в качестве связующего в гидроизоляционных мастиках для изоляции подземных частей зданий и сооружений. НСБП хорошо смешивается с эмульгатором, а приготовленная мастика легко наносится на изолируемую поверхность. Компоненты для изготовления гидроизоляционной мастики (глина, известь) доступны и недороги. Гидроизоляционные НСБП-мастики быстро готовятся непосредственно на стройплощадке в требуемых для нанесения количествах, что позволяет практически исключить строительные отходы от гидроизоляции и не оказывать дополнительной нагрузки на окружающую среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Social da Silva L., de Camargo Forte M. M., de Alencastro Vignol L., Cardozo N. S. M. Study of rheological properties of pure and polymer-modified Brazilian asphalt binders. *Journal of Materials Science*. 2004; 39(2): 539–546. <https://doi.org/10.1023/b:jmsc.0000011509.84156.3b>
2. Polacco G., Berlincioni S., Biondi D., Stastna J., Zanzotto L. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*. 2005; 41(12): 2831–2844. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>
3. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. Нанотехнологии в производстве асфальтобетона // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1–1. С. 191–195. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30925>
4. Ключев С.В., Ключев А.В. Техногенное сырье – эффективный наполнитель для фибробетонов // *Успехи современной науки*. 2015. № 1. С. 33–35.
5. Романов П.С., Пантелова Х.М. Применение нанотехнологий в дорожном строительстве в России // *Территория науки*. 2016. № 4. С. 63–67.
6. Tang N., Huang W., Xiao F. Chemical and rheological investigation of high-cured crumb rubber-modified asphalt. *Construct. Build. Mater*. 2016; 123: 847–854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.131>
7. Боев Е.В., Исламутдинова А.А., Аминова Э.К. Получение закрепителя для гидроизоляционных дорожных битумов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2021. Т. 13, № 5. С. 319–327. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-319-327>
8. Красновских М.П., Чудинов С.Ю., Слюсарь Н.Н., Пугин К.Г., Вайсман Я.И. Производство наноструктурного модификатора битумов при переработке автомобильных покрышек // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14, № 6. С. 501–509. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-501-509>
9. Munera J. C., Ossa E. A. Polymer modified bitumen: Optimization and selection. *Materials & Design*. 2014; 62: 91–97. <https://doi.org/doi:10.1016/j.matdes.2014.05.009>

10. Гордеева И.В., Мельников Д.А., Горбатова В.Н., Резниченко Д.С., Наумова Ю.А. Исследование влияния процесса модификации на групповой состав битума и модификаторов методом Фурье-ИК спектроскопии // Тонкие химические технологии. 2020. 15(2). С. 56–66. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-2-56-66>
11. Никольский В. Г., Дударева Т. В., Красоткина И. А., Зверева У. Г., Бекешев В. Г., Рочев В. Я., Каплан А. М., Чекунаев Н. И., Внукова Л. В., Стырикович Н. М., Гордеева И. В. Разработка и свойства новых наномодификаторов для дорожного покрытия // Химическая физика. 2014. Т 33, № 7. С. 87–93.
12. Behnood A., Modiri Gharehveran M. Morphology, Rheology and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders. *European Polymer Journal*. 2019; 112: 766–791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
13. Босник В.Б., Вайсман Я.И., Кетов А.А., Красновских М.П., Рудакова Л.В. Перспективные направления получения битумоподобных материалов на основе отходов синтетических полимеров // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 5. С. 34–39. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-34-39>
14. Руководство по устройству холодной асфальтовой гидроизоляции и безрулонных кровель: П 13-73 ВНИИГ. Энергия, 1973. 76 с.
15. Тыртышов Ю.П., Печеный Б.Г., Курбатов В.Л., Ещенко А.И. Оптимизация составов, технологии приготовления битумных паст и мастик // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 70–72.
16. Chen M., Javilla B., Hong W., Pan C., Riara M., Mo L., Guo M. Rheological and Interaction Analysis of Asphalt Binder, Mastic and Mortar. *Materials*. 2019; 12: 128. <https://doi.org/10.3390/ma12010128>
17. Малянова Л.И. Модифицированный асфальтобетон с отходами дробления известняков в дорожных одеждах // Строительные материалы. 2018. № 7. С. 24–27. <https://10.31659/0585-430X-2018-761-7-24-27>
18. Liu Z., Wang H., Gong X., Cui P., Wei H. Stiffening and Toughening of Asphalt Mastic Induced by Bitumen–Mineral Selective Molecular Adsorption and Nanostructural Reconstruction. *Sustainability*. 2023; 15: 4398. <https://doi.org/10.3390/su15054398>
19. Dong Z., Liu Z., Wang P., Gong X. (2017). Nanostructure characterization of asphalt-aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. *Fuel*; 189: 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.077>
20. Carpani C., Bocci E., Prospero E., Bocci M. Evaluation of the rheological and performance behaviour of bitumen modified with compounds including crumb rubber from waste tires. *Construction and Building Materials*. – 2022; 361: 129679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129679>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кетов Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, alexander_ketov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5472-2194>

Красновских Марина Павловна – кандидат технических наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, krasnovskih@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5187-5590>

Калинина Елена Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, kalininaelena1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6965-4895>

Офрихтер Вадим Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, ofrikhter@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0803-2392>

Татьянников Даниил Андреевич – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, danco777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9494-2546>

ВКЛАД АВТОРОВ

Кетов А.А. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования.

Красновских М.П. – проведение экспериментов и визуализация полученных данных.

Калинина Е.В. – обеспечение литературными ресурсами и анализ литературы, привлечение финансирования.

Офрихтер В.Г. – написание исходного текста статьи, составление итоговых выводов.

Татьянников Д.А. – проведение экспериментальной работы, сбор и систематизация экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 26.05.2023; принята к публикации 30.05.2023.