

Научная статья

УДК 625.85: 665.775.4

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-453-464>

CC BY 4.0

Комплементарное улучшение макромолекулярными нанокompозитами технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог

Антон Олегович Глазачев , Ольга Владимировна Иванова* , Дмитрий Александрович Синицин ,
Ранис Мидхатович Ахметшин 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Проблему увеличения эксплуатационной стойкости асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог в полной мере не решает использование традиционных решений за счет улучшения подбора состава и совершенствования процесса изготовления композиций битумных вяжущих и минеральных наполнителей. Одним из наиболее перспективных способов повышения работоспособной долговечности асфальтобетона является комплементарная модификация битумов и дорожно-бетонных нанокompозиций термопластичными и эластичными полимерами. **Методы и материалы.** Битумные вяжущие оцениваются соответствующими методами определения технологических показателей: растяжимости, температуры размягчения и хрупкости, эластичности и др. Асфальтены битумных вяжущих являются важнейшим структурообразующим компонентом и формируют ассоциированные нанокластеры размерами 15–200 нм. Термопластичные блок-сополимеры вводят в состав битумных вяжущих в гранулированном виде (крошки) или расплава, а для улучшения совместимости комплементарных сополимеров в битумной вяжущей используют компатилизаторы. На качество готовой асфальтобетонной композиции существенно влияют характеристики основных компонентов: минерального порошка, песка, щебня, битумной вяжущей и макромолекулярных нанодобавок, а также оптимальные режимы технологического процесса: температура перемешивания и др. **Результаты.** Комплементарное взаимодействие супрамолекулярных ассоциаций асфальтенов и фрагментов макромолекул полимерных нанокompозитов обеспечивает формирование Ван-дер-Ваальсовых связей за счет пространственного взаимного соответствия. Введение полимерных наномодификаторов приводит к увеличению температуры размягчения и снижению температуры хрупкости битумных вяжущих за счет образования достаточно устойчивых надмолекулярных комплексов. **Обсуждение.** Синергетические нанодобавки макромолекул в битумное вяжущее обеспечивают увеличение адгезии битумной композиции к минеральным компонентам в несколько раз, а также заметное увеличение температурного интервала пластичности и деформируемости. Асфальтобетонные покрытия с полимерно-битумными вяжущими увеличивают работоспособность дорожного полотна автодорог и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колея) в условиях высоких и низких температур. **Заключение.** Битумные вяжущие дорожных асфальтобетонов, модифицированные полимерными нанокompозитами, имеют более высокую адгезию, расширенный диапазон термопластичности и водостойкости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетонное покрытие, полимерный нанокompозит, комплементарное взаимодействие, управление качеством, полимерно-битумное вяжущее, наноструктурный модификатор.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках реализации программы академического стратегического лидерства «Приоритет 2030».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глазачев А.О., Иванова О.В., Синицин Д.А., Ахметшин Р.М. Комплементарное улучшение макромолекулярными нанокompозитами технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 453–464. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-453-464>. – EDN: YXAYKH.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение интенсивности и грузонапряженности автомобильного движения на основных маги-

стралях России и Башкортостана приводит к быстрому деформативному разрушению асфальтобетонных покрытий. Одной из существенных причин преждевременного разрушения верхних слоев асфальтобе-

© Глазачев А.О., Иванова О.В., Синицин Д.А., Ахметшин Р.М., 2023

тонных дорожных покрытий при резких колебаниях температуры является формирование микротрещин с последующим эрозионным шелушением и нарастающим образованием дефектов (выбоин с глубиной более 3 см и др.) [1–4]. Снижение водо- и морозостойкости асфальтобетона и, как следствие, уменьшение времени эксплуатации происходит также из-за понижения адгезии битумных вяжущих с поверхностью минеральных заполнителей. Разработки новых технологических решений многотоннажного производства битумных нановяжущих материалов и увеличение их эксплуатационного ресурса являются актуальным направлением реализации национального проекта «Безопасные и качественные дороги» Российской Федерации.

Для увеличения срока эксплуатации асфальтобетонных покрытий автодорог разработаны битумные композиционные вяжущие, среди которых особенно следует выделить полимерно-битумные композиции [5, 6]. Асфальтобетонные смеси с полимерно-битумными вяжущими увеличивают работоспособность покрытий дорожного полотна и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колея) в условиях высоких и низких температур. Оптимальный выбор состава асфальтобетона и способность эффективно сопротивляться реальным эксплуатационным нагрузкам без нарушения сплошности покрытия зависят от категории автомобильной дороги и природно-климатических условий региона.

Цель данной статьи – исследование применения полимерных нанокомпозитов для технологичного усиления параметров эксплуатационной стойкости асфальтобетонных дорожных покрытий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Асфальтобетон – оптимально подобранная и перемешанная в нагретом состоянии смесь минеральных материалов и битума (покрытия автодорог), классифицируется по определенному перечню технологических параметров, каждый из которых влияет на физико-механические характеристики, функциональное состояние и долговечность [7]. Асфальтобетонные дорожные покрытия подразделяются по следующим основным параметрам: типу заполнителя (многокомпонентному составу); температуре изготовления и укладки; пористости; марке и т.п.

Нефтяной битум является наиболее используемым в дорожном строительстве вяжущим материалом, так как превалирует по сравнению с аналогами по доступности, стоимости, эффективности. Технологическая долговечность битумных вяжущих в асфальтобетонах непосредственно сопряжена с нанодисперсной микроструктурой, обусловленной количественным соотношением основных компонентов: масел (ароматические, нафтенные и парафиновые углеводороды с молярной массой ≈ 500 – 1500 г/моль), олигомерных смол и макроциклических асфальтенов [8–10]. Химический состав и соотношение масел, смол и асфальтенов в дорожных битумах достаточно сильно варьирует в зависимости от исходного нефтяного сырья и технологии вакуумной окислительной переработки гудронов на нефтеперерабатывающих заводах.

При температуре 120°C и выше асфальтены находятся в молекулярно-дисперсионном состоянии, а при более низких температурах они образуют ассоциированные надмакромолекулярные комплексы (рис. 1). Битумные асфальтены имеют повышенную

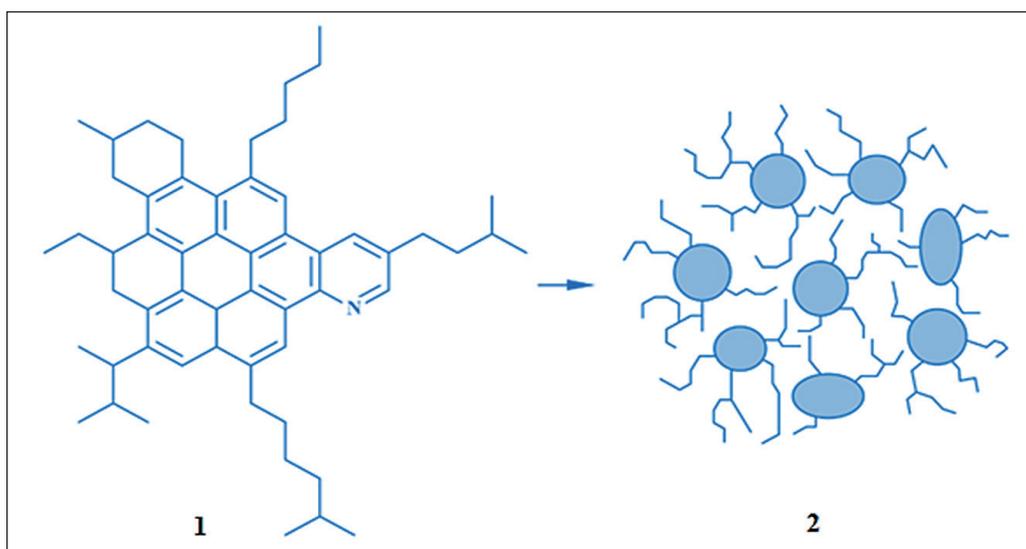


Рис. 1. Схема образования ассоциированных комплементарных супрамолекулярных комплексов битумных асфальтенов: 1 – асфальтен; 2 – наноагрегатный кластер

склонность к ассоциации за счет межмолекулярных стэкинг π-π взаимодействий и формированию супрамолекулярных жидкокристаллических наноструктур: агрегатные фрактальные нанокластеры размерами 15–200 нм [11].

Асфальтены битумных нановязущих за счет подверженности к супрамолекулярным комплементарным ассоциациям являются важнейшим структурообразующим компонентом асфальтобетонов. Гетероциклические битумные асфальтены формируют надмолекулярные фрактальные наноструктуры, которые представляют собой дискообразную непланарную стопку полициклических макромолекул с межплоскостным расстоянием $\approx 0,4$ нм [12–15].

В строительном материаловедении традиционно считается, что наноструктура битумных материалов представляет собой коллоидную систему, в которой диспергированы фрактальные асфальтены, а дисперсионной средой являются олигомерные смолы и углеводородные масла. Супрамолекулярные асфальтены битума диспергированы в виде микрочастиц размерами от 18 до 20 мкм, которые окружены молекулярными оболочками тяжелых смол и масел с убывающей плотностью.

Асфальтобетонное дорожное покрытие представляет собой композиционный уплотненный материал, изготавливаемый смешением минеральных компонентов (песка, щебня) оптимальных размеров, агрегированных битумом (не более 10–15 % массовой доли). При оптимальном соотношении битумов и наполнителей битумное вяжущее – комплементарная матрица – находится в адсорбированном состоянии на шероховатой поверхности частиц тонкомолотых минеральных порошков. Слабая адгезия битумных нановязущих с поверхностью минеральных наполнителей приводит к преждевременному разрушению асфальтобетонных дорожных покрытий.

Минеральный каркас асфальтобетона формирует смесь из минерального порошка (материала, полученного помолом карбонатных – известняки и доломиты – или некарбонатных горных пород, либо из твердых отходов промышленности), песка и щебня с соответствующим гранулометрическим составом согласно ГОСТ 32761-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования» и ГОСТ 33029-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава».

Основные требования к минеральному порошку нормируются по следующим показателям: зерновому составу (мельче 2 мм; 0,125 мм и 0,063 мм), пористости и др. Зерновой (гранулометрический) состав минеральной части асфальтобетонных щебеночно-мастичных смесей определяют на ситах с номиналь-

ными размерами ячеек: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16,0; 22,4; 31,5 мм. Минеральный порошок изготавливают чаще всего в производстве активированным (с добавками поверхностно-активных веществ) для усиления комплементарного эффекта; активированные минеральные порошки преимущественно гидрофобны. Одним из методов активации минеральных порошков во время технологического помола является физико-химическая обработка их поверхности, осуществляемая анионоактивными поверхностно-активными веществами из отходов жиропереработки [16].

Расчет оптимального соотношения минеральных компонентов: щебня (гравия), песка, минерального порошка – должен обеспечивать установленное содержание зерен крупной и мелкой фракции в общем составе заполнителей, которое обеспечивает долговечность (одновременно прочность, экономичность) дорожного покрытия. Структура гранулометрической (зерновой) части ограничивается предельными кривыми (рис. 2) допустимого количества проектируемой фракции зерен; в результате эксплуатационные показатели основных характеристик асфальтобетона соответствующей марки будут отвечать техническим нормам.

Асфальтобетонные смеси в зависимости от заполнителя подразделяют на щебеночные, гравийные, песчаные; по плотности – на высокоплотные (остаточная пористость от 1,0 % до 2,5 %), плотные (остаточная пористость свыше 2,5 % до 5,0 %), пористые, высокопористые. Основной компонент мелкозернистого асфальтобетона для устройства верхнего слоя дорожного покрытия – щебень фракцией до 20 мм. Щебеночные (гравийные) плотные асфальтобетоны в зависимости от содержания в них щебня (гравия) подразделяются на несколько типов, например, тип Б (содержание щебня от 40 % до 50 %). Для смесей типа Б содержание зерен щебня пластинчатой и игловатой формы должно быть не более 25 % по массе.

В соответствии с ГОСТ Р 58406.1-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия» требования к асфальтобетонам предъявляются по показателям, характеризующим параметры структуры (остаточная пористость, пористость минеральной части, водонасыщение), физико-механические свойства по параметрам прочности (при сжатии при температурах 20°C и 50°C и на растяжение при расколе при температуре 0°C) и сдвигоустойчивости (коэффициент внутреннего трения и сцепления при сдвиговой деформации).

Испытания асфальтобетонного дорожного покрытия включают в себя ряд методов, контролируемых технологические свойства битумно-минераль-

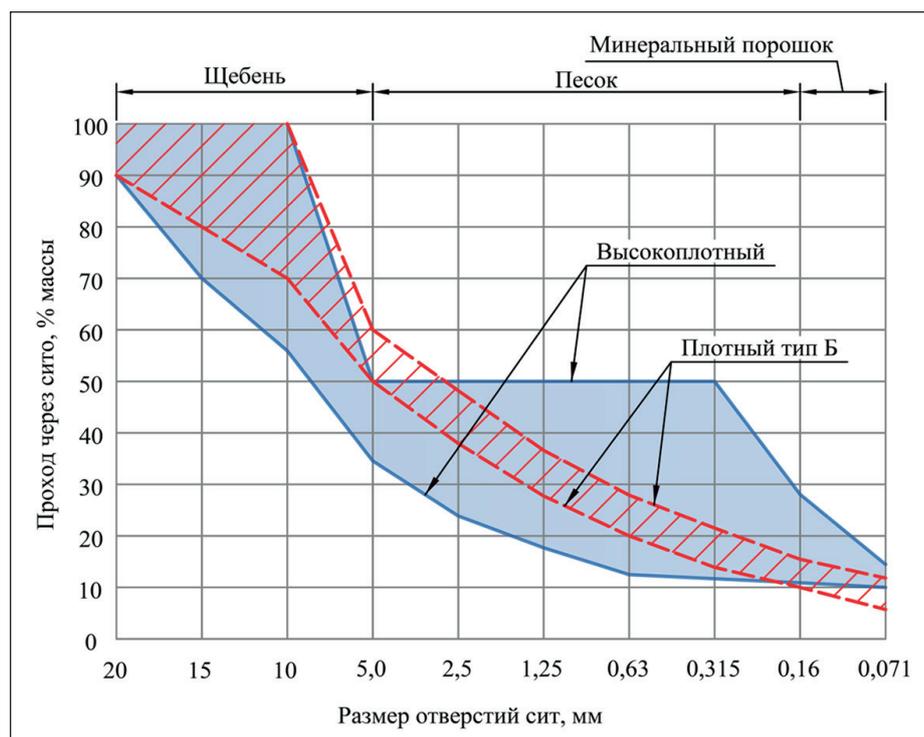


Рис. 2. Проектирование гранулометрического состава минеральных компонентов верхнего слоя дорожного покрытия на базе предельных кривых мелкозернистых асфальтобетонов

ных композиций. Физико-механические характеристики битумных вяжущих оцениваются при помощи следующих показателей: растяжимости, температуры размягчения и хрупкости, эластичности, так как они определяют большинство технологических параметров асфальтовых дорожных бетонов. Изучение реологических свойств битума (в частности, динамической вязкости при 60°C) с полимерными нанодобавками позволяет оценить их влияние на структуру асфальтобетонной смеси, выбрать оптимальное их сочетание и дозировку, получать асфальтобетонные смеси с требуемыми характеристиками: устойчивостью асфальтобетонных дорожных покрытий к колееобразованию, повышенной уплотняемостью при пониженных температурах.

Для расширения интервала пластичности и температурного интервала применения битумных вяжущих, усиления адгезии и шероховатости в асфальтобетонах применяют их модифицирование, заключающееся во введении различных нанодобавок. В качестве макромолекулярных улучшителей технологических характеристик асфальтобетонных покрытий могут использоваться блоксополимерные стирол-бутадиен-стирол, атактический полипропилен, изотактический полипропилен и т.п. [17–20].

Результативное добавление в состав битумных композиций модифицирующих полимерных наноконструкций является эффективным методом комплементарного улучшения физико-механических характеристик битумов и повышения долговечности дорожных покрытий. Комплементарное (взаимо-

дополняющее) взаимодействие фрагментов макромолекул полимерных наноконструкций и супрамолекулярных ассоциаций асфальтенов обеспечивает формирование Ван-дер-Ваальсовых связей за счет пространственного взаимного расположения.

Схема метода приготовления битумного модифицированного нановяжущего: нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100 нагревали до 170–180°C при перемешивании в гидродинамических смесителях со скоростью 140–150 оборотов/мин. Далее добавляли бутадиен-стирольный сополимер 4% (по массе); затем увеличивали обороты до 700–800 оборотов/мин и перемешивали 50–60 мин до получения гомогенной полимерно-битумной наноконструкции. Показатель эластичности макромолекулярно-битумных наноконструкций определяли с помощью дуктилометра нахождением растяжимости модифицированного нановяжущего при температуре +25°C и 0°C; эластичность при +25°C характеризует технологические характеристики трехмерной наносетки, а при 0°C работоспособность при низких температурах.

В качестве макромолекулярных наноконструкций, применяемых часто для улучшения морозостойкости термоэластичных характеристик битумов следует отметить использование комплементарно совместимых бутадиен-стирольных каучуковых сополимеров дендримерной разветвленной структуры [21]. Эластичные бутадиеновые и жесткие стирольные блоки могут полимеризоваться в форме разнообразных сополимеров, а жесткие полистирольные домены размерами 350–700 нм выполняют в макромолекуле

роль функции узлов вулканизационной наносетки и усиливают синергетический эффект.

Бутадиен-стирольные нанокompозитные сополимеры с молярной массой $\approx 10^5$ достаточно хорошо совмещаются с битумными дорожными вяжущими за счет набухания в нафтенно-ароматических углеводородах битумного вяжущего и частичного растворения при температуре 175°C [22]. Термопластичные блок-сополимеры вводят в состав битумных вяжущих в гранулированном виде (крошки) или расплава, а для улучшения совместимости модифицирующих сополимеров и битумной вяжущей используют пластификаторы: индустриальные масла, нефтяные гудроны, межфазные компатибилизаторы и др. Оптимальный подбор группового химического состава компаундированных дорожных битумов обеспечивает формирование нанодисперсной структуры битума типа «золь-гель» [23].

В процессе приготовления улучшенного полимерными наномодификаторами асфальтобетона осуществляют постоянный контроль технологического процесса и испытание образцов асфальтобетонных покрытий. Эффективное цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси [24] позволяет выработать оптимальный вариант функционирования технологической линии. Характеристики основных компонентов: песка, щебня, минерального порошка, комплементарной битумной вяжущей и макромолекулярных нанодобавок, а также параметры технологического процесса учитываются как критерии при управлении качеством готовой асфальтобетонной смеси. Разнообразные виды асфальтобетонов для создания дорожных покрытий отличаются по составу комплементарных сырьевых материалов, технологии изготовления и физико-механическим характеристикам.

Векторы комплементарного совершенствования дорожных асфальтобетонных композиций разнообразными добавками направлены на обеспечение самозалечивания микротрещин дорожного покрытия, самоочистки зимних снежно-ледяных отложений [25]. Температурная устойчивость характеризуется способностью асфальтобетона противостоять температурным перепадам: термопластичный асфальтобетон трансформирует более плавно термомеханические свойства от пластичных (при высоких температурах) до хрупких (при низких температурах) и стабильностью к сдвиговым деформациям и образованию трещин.

Наиболее легко воспроизводимыми показателями температурной устойчивости являются значения предела прочности на сжатие асфальтобетона при температурах +50°C, +20°C и 0°C. В соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009 «Смеси асфальто-

бетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» минимальное значение этого показателя при +50°C не менее 0,9 МПа (характеризует способность асфальтобетона противостоять сдвиговым деформациям), а максимальное – не более 12 МПа при 0°C.

Битумное вяжущее испытывают на сцепление с поверхностью щебня – комплементарного минерального компонента, при сцеплении битумного вяжущего ниже четырех баллов дополнительно применяют адгезионную термостабильную добавку в количестве 0,3–0,5%. В качестве стабилизирующих нанодобавок и модификаторов щебеночно-мастичных асфальтобетонов используют гранулированное или негранулированное целлюлозное волокно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплементарная супрамолекулярная пространственная сетка, образующаяся в битуме с участием бутадиен-стирольных нанокompозитных сополимеров, придает достаточно высокую прочность, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям [26] асфальтобетонным покрытиям автодорог в интервале температур от –80°C до +90°C; это особенно заметно в условиях возрастания интенсивности движения большегрузных автомобилей. Следует отметить, что для производства модифицированных полимерно-битумных вяжущих необходимо повысить адгезионные характеристики к поверхности комплементарных минеральных наполнителей. Высокие показатели адгезии свидетельствуют о способности модифицированного битума удерживаться на поверхности заполняющих материалов при разрушающем воздействии на них молекул воды.

В дисперсионной среде битумных вяжущих макромолекулярные наномодификаторы образуют трехмерную наносетку и существенно резко усиливают эластичность, которая характеризует способность вяжущего к обратимым, эластическим деформациям; также одновременно снижается температура хрупкости и повышается температура размягчения. Дорожный битум должен обладать необходимой адгезией к поверхности наполнителей для обеспечения требуемого коэффициента длительной водостойкости и продолжительной эксплуатации асфальтобетонного покрытия без эрозии [27]. Активация минерального порошка асфальтобетонной смеси влияет на комплементарные факторы структурообразования дорожной композиции. При смешивании битумной вяжущей с микрочастицами минерального порошка, под действием комплементарных межмолекулярных взаимодействий происходит фрактальная хемосорбция асфальтоновых нанокластеров на шероховатой поверхности минерального компонента.

Комплементарные, пространственно взаимодействующие макромолекулы, содержащие функциональные группы за счет Ван-дер-Ваальсовых, водородных, гидрофобных, ион-дипольных и электростатических взаимодействий, приводят к возникновению достаточно большого числа межмолекулярных связей, определяющих динамизм надмолекулярного структурообразования [28] асфальтобетонных покрытий. Для технологического производства требуемого битумно-полимерного нановязущего вводят в битум 3–5% бутадиен-стирольного наноконкомпозита, 0,5–1% адгезионной нанодобавки – межфазного компатибилизатора и 4–5% пластифицирующего компонента (рис. 3).

Трещиностойкость асфальтобетонного дорожного покрытия существенно зависит от способности битумных нановязущих эксплуатироваться в зоне обратимых деформаций. Наиболее доминирующим фактором появления и роста микротрещин в асфальтобетонном покрытии при совместном действии механических нагрузок, колебаний температур и агрессивных сред является диффузия разрушающих агентов в контактную зону между минеральным наполнителем и пленкой битумного нановязущего.

В результате комплементарной модификации нефтяных дорожных битумов макромолекулами производятся асфальтополимербетоны, способные

противостоять колебаниям, усталостному разрушению, трещиностойкости и термоокислению. Следует также отметить, что для обеспечения повышенной устойчивости к сдвигу и образованию трещин асфальтобетонных покрытий в качестве наполнителей используют стекловолокна, полимерные фибры и модифицированные дивинил-стирольные термоэластопласты древесного строения [29]. Адгезионные полимерные добавки облегчают формирование прочных комплементарных связей между битумной вязущей и механо-активированными минеральными наполнителями, снижают эрозионное отслаивание и усиливают гидроизолирующие характеристики.

Основные недостатки битума – атмосферное термоокислительное старение и, что более важно, низкая деформационная стабильность в интервале температур эксплуатации: стеклование и охрупчивание в осенне-зимний период и течение (оплывание, колеобразование и т.п.) в летний сезон. Физико-химические причины технологических дефектов асфальтобетонных покрытий заключаются в дисперсной структуре битумов – практическое отсутствие макромолекулярных соединений: асфальтены – полициклические твердые продукты, а мальтены (смолы и масла) – олигомеры с молекулярной массой более 2500–3000, которые предопределяют лишь вязкотекучие деформации битумных нановяз-

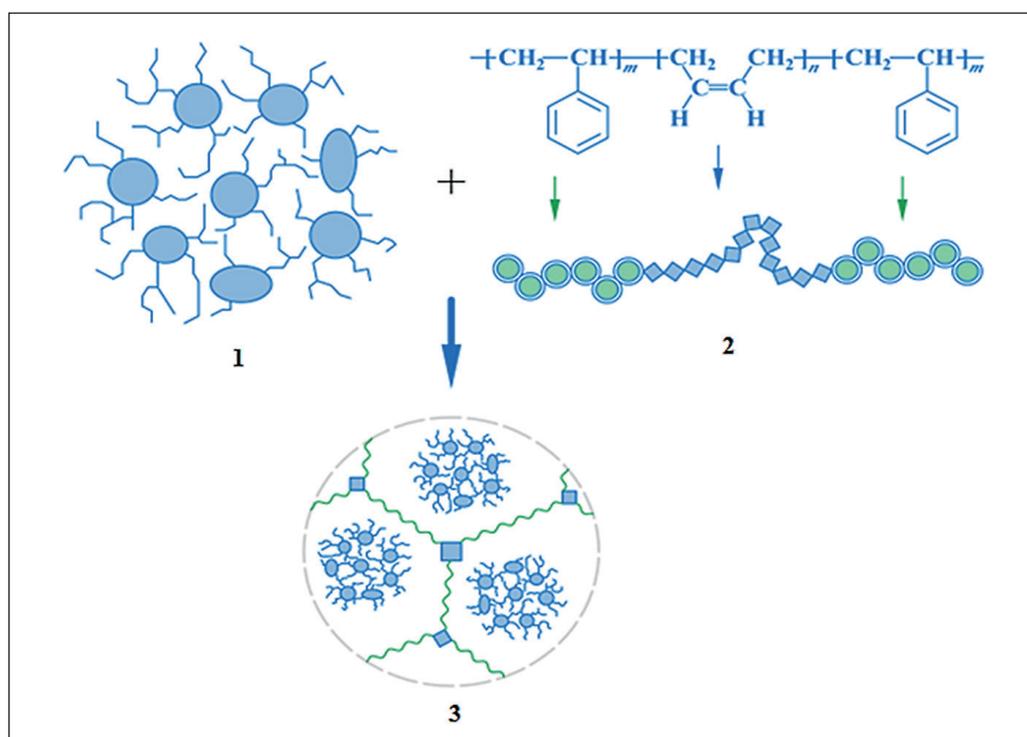


Рис. 3. Схема микроструктуры битумных вязущих, модифицированных бутадиен-стирольными сополимерами: 1 – битумный наноагрегатный кластер; 2 – макромолекула бутадиен-стирольного сополимера; 3 – полимерно-битумное нановязущее

жущих в узком температурном интервале. Широко используемые модификаторы битума – бутадиев-стирольные блок-сополимеры – при введении в битумное вяжущее [30] не решают полностью проблему подверженности его атмосферному старению ввиду большого количества двойных связей в макромолекуле; общим недостатком таких композиций является расслаиваемость их под действием разных плотностей битумов и полимеров.

Исходный нефтяной битум марки БНД 60/90 не полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ: глубина проникания иглы (пенетрация) 0,1 мм (при 25°C) – 61 (требование 61–90); температура размягчения по кольцу и шару – 43°C (требование не ниже 47); растяжимость (при 25°C) – 124 см (требование не менее 55); температура хрупкости – минус 17°C (требование не выше минус 15). Битум марки БНД 60/90 был модифицирован внесением 1% измельченной ПЭТФ и 0,4% комплементарной нанодобавки, благодаря чему удалось получить качественный аналог марки БНД 130/200, отвечающий нормативным требованиям: глубина проникания иглы 0,1 мм (при 25°C) – 152 (при треб. 131–200); температура размягчения по кольцу и шару – 41,2°C (при треб. не ниже 40); растяжимость (при 25,0°C) – 94,7 см (при треб. не менее 70); температура хрупкости – минус 28°C (при треб. не выше минус 18).

Другим перспективным подходом комплементарного улучшения макромолекулярными нанокompозитами технологических характеристик асфальтобетонных дорожных покрытий является модификация битумов реакционноспособными добавками: такие модификаторы можно вводить в меньших количествах, а получающиеся композиции не расслаиваются. Например, «Элвалой» (Elvaloy, выпускается компанией Du Pont) – термореактивный сополимер этилена с бутилакрилатом и дифункциональным глицидилметакрилатом. В результате модифицирующего использования «Элвалоя» происходит физико-химическая реакция между эпоксигрупой глицидилметакрилата и карбоксильными группами асфальтенов [31]. Добавление небольшого количества 1–1,5% «Элвалоя» в битумное вяжущее БНД 90/130 усиливает эластичность от 60% до 90%, а также приводит к увеличению температуры размягчения битумного вяжущего; существенно вырастает когезия и увеличивается адгезия с минеральными компонентами асфальтобетона.

ОБСУЖДЕНИЕ

Асфальтобетон – нанокompозит, основу которого составляют минеральные частицы разных размеров, агрегированные битумом (не превышает 10% от массы материала), свойствами которого определяется

большинство физико-механических показателей дорожного покрытия. Битумные вяжущие проявляют себя в качестве типичных нефтяных нанодисперсных систем, адгезионные характеристики которых определяются наноструктурными частицами – асфальтенами дисперсной фазы. Содержание компонентов асфальтобетонной смеси жестко нормируется требованиями ГОСТ в зависимости от условий работы дорожного покрытия.

Основной вяжущий компонент дорожных покрытий – битум – имеет ряд существенных недостатков: слишком узкий интервал пластичности и низкий комплекс технологических параметров, необходимых для создания высококачественных автодорог, особенно при температурах ниже нуля [32]. Макромолекулярные комплементарные наномодификаторы асфальтобетонных композиций должны обладать также достаточно высокой термостойкостью (выше температуры текучести битума) до 180–200°C. Битумные вяжущие на всех этапах жизненного цикла: в процессе изготовления, хранения, транспортирования и в составе асфальтобетонных дорожных покрытий подвергаются значительным физико-химическим, механическим и термоокислительным воздействиям [33].

Поэтому возникает настоятельная потребность в улучшении свойств дорожного битума путем введения в него модифицирующих нанодобавок, ингибиторов термо-окислительного старения. Полимербитумные новояжущие (стирол-бутадиев-стирол 2–3% по массе) одновременно с коагуляционным «каркасом» из супрамакроциклических асфальтенов содержат эластичную наносетку из макромолекулярных блок-сополимеров.

Следует отметить, что решающее влияние на технологические характеристики асфальтобетонных покрытий оказывают адгезионные межфазные процессы, происходящие на поверхности зерен минерального порошка при взаимодействии его с битумом (рис. 4). Деформативные разрушения по контактной межфазной зоне проистекают часто из-за малой когезионной прочности макромолекулярной битумной микропленки и недостаточной адгезии битумного материала к поверхности минеральных компонентов асфальтобетона. Введение модификаторов в битум должно обеспечивать увеличение комплементарной адгезии битумного связующего к минеральным компонентам в несколько раз, а также заметное увеличение температурного интервала пластичности и деформируемости.

К полимерным компонентам, используемым для модификационного улучшения дорожных битумов, предъявляется ряд технико-экономических требований: хорошая совместимость с битумами; широкий температурный диапазон высокоэластичности от –60°C до +100°C; низкая себестоимость. Физи-

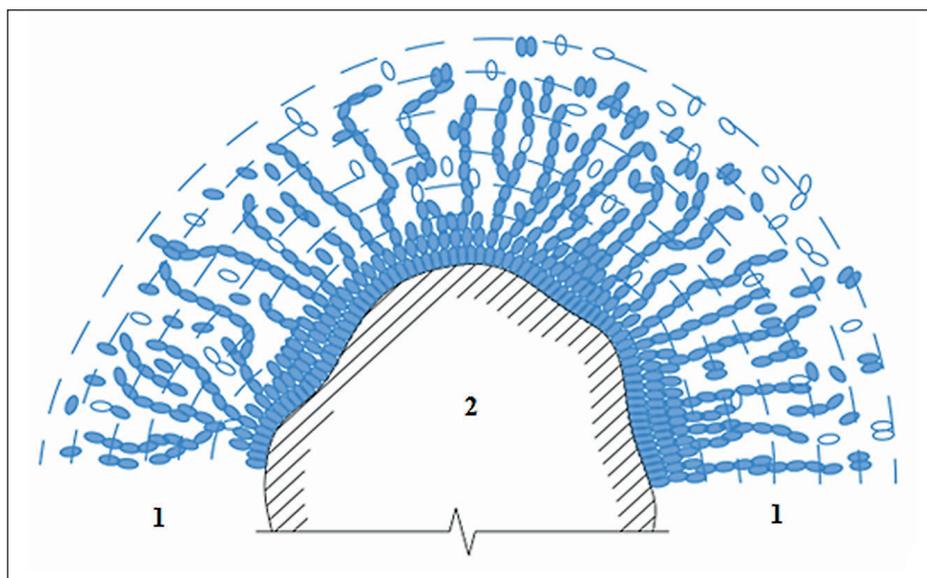


Рис. 4. Схема межфазового комплементарного взаимодействия битумно-полимерного вяжущего (1) с поверхностью минерального наполнителя (2)

ко-механические и реологические характеристики асфальтобетонных покрытий автодорог в значительной степени зависят от качества и соотношения битумного и минеральных компонентов. При приготовлении и транспортировке асфальтобетонных смесей помимо действия повышенной температуры (170–200°C) на них оказывают влияние межфазовые поверхностные явления в пограничных слоях контакта вяжущего и минерального наполнителя, а в эксплуатируемом асфальтобетоне дорожного современного полотна – разнообразные климатические и физико-механические влияния.

При нарушениях технологии изготовления асфальтобетонных композиций молекулы воды проникают на межфазную поверхность между битумом и минеральным материалом и разрушают адгезионные связи в уложенных дорожных покрытиях. Результатом действия инкапсулированных наномодификаторов [34] является востребованное повышение технических и эксплуатационных характеристик асфальтобетона; такой же эффект достигается при структурировании битумного нановяжущего на границе раздела. В этом случае комплементарный эффект достигается уменьшением содержания битума в асфальтобетонной смеси при упорядоченном расположении частиц минерального порошка. В отличие от модификации асфальтобетона, где происходит самоорганизация наноструктуры вследствие введения модификаторов, при структурировании асфальтовяжущего упорядочение структуры реализуется путем механического воздействия на частицы наполняющего материала в процессе окатывания минеральных гранул.

Оптимизированный режим движения наземного автотранспорта и техническая категория являются критериями для выбора комплементарного типа асфальтобетона, обеспечивающего сдвигоустойчивость

и шероховатость дорожного покрытия. Рекомендуемые области применения различных асфальтобетонов являются основными факторами использования допустимых видов и марок асфальтобетона; марка асфальтобетонной смеси поднимается с повышением категории дороги и ухудшением дорожно-климатических условий. Так, для участков автомобильной дороги с регулярным торможением и остановкой автотранспорта выбирают асфальтобетонные смеси с повышенным содержанием щебня и использованием дробленого песка.

Следует отметить, что в процессе устройства асфальтобетонного покрытия и в период его формирования очень важно комплементарное управление качеством дорожного строительства: тщательный контроль выровненности и плотности грунтового основания; правильность установки бортовых камней (бордюров), решеток и люков колодцев инженерных и подземных сетей; равномерность толщины слоя асфальтобетона с учетом коэффициента уплотнения; соответствие поперечного и продольного уклонов проекту автодороги и др. Так, для эффективного контроля оценки качества асфальтобетонного дорожного покрытия берут пробы: вырубку и керны не ближе 1,5 м от бортового камня; следует отметить, что лабораторные пробы отбирают не ранее, чем через 3 суток после окончания уплотнения и до начала движения автотранспорта из расчета – одна проба с каждых 3000 м² [35]. Нормативную толщину укладываемого слоя асфальтобетонного дорожного покрытия инструментально контролируют в процессе укладки металлическим шупом с делениями; требуемую равномерность распределения укладываемого слоя и качество отделки стыков смежных полос тщательно проверяют специальными приборами (рис. 5).



Рис. 5. Контроль укладки асфальтобетонного дорожного покрытия с использованием полимерно-битумных наноконпозиций

Отметим также, что дорожные битумы по комплексу технологических, эксплуатационно-технических и экономических показателей до последних 20 лет в общем удовлетворяли потребителей, а невысокая долговечность компенсировалась низкой стоимостью, оправдывая ремонт асфальтобетонных покрытий. Однако с ростом цен на нефть и энергию, с одной стороны, и с возрастанием интенсивности воздействий на дорожные покрытия, с другой (увеличение осевой нагрузки автомобилей и рост интенсивности движения на автодорогах), экономически целесообразный срок службы асфальтобетонных покрытий стал превышать их фактическую долговечность.

По сравнению с асфальтобетонами на традиционных нефтяных битумах комплементарные полимерасфальтобетоны характеризуются меньшей чувствительностью к изменению температуры, повышенной динамической устойчивостью, сдвигоустойчивостью и колеестойкостью, деформативностью при низких температурах, более высокой морозостойкостью. Срок службы дорожных покрытий с использованием полимерасфальтобетонов превышает срок эксплуатации асфальтобетонных покрытий с применением битумов в 2–3 раза по специально разработанной шкале, включая требования к большегрузным транспортным нагрузкам. В 2021 году по всей России было использовано более 1 млн тонн модифицированных полимерами битумных вяжущих при строительстве новых скоростных автомагистралей.

В настоящее время продолжают востребованные разработки оптимизированных рецептур битумных нановяжущих, адаптированных под климатические условия регионов средней полосы России и возрастающую интенсивность автотранспортного движения. Однородная плотность асфальтобетонных смесей, являющаяся комплементарным фактором усиления долговечности и стабильности дорожных покрытий, достигается за счет непрерывной укладки композиции таким образом, чтобы асфальтобетон

не сегрегировал фракционно, а затем равномерно уплотнялся катками [36].

Статистический анализ показывает, что в Российской Федерации объем выпуска битумных материалов в 2022 году составил около 7,7 млн тонн; при этом технологические мощности российских производителей уже сейчас позволяют увеличить производство до 14,5 млн тонн. Российскими битумами продолжают интересоваться традиционные партнеры-экспортеры, дружественные страны евразийского экономического союза. В рамках Технического регламента Таможенного союза (ТР ТС 014/2011) строительство автомагистральных дорог осуществляется с применением инновационных наноматериалов и технологичным управлением дорожных машин и оборудования [37, 38].

Цифровые нанотехнологии за счет анализа больших баз данных позволяют подбирать оптимальный состав асфальтобетонных смесей, искусственный интеллект становится полноценным участником создания новых рецептур битумных нановяжущих, использование статического зондирования в 3D проектировании строительства региональных и федеральных автодорог, управлении дорожно-строительными машинами [39–41]. Для решения проблемы абразивного износа и комплементарного улучшения макромолекулярных наноконпозиций технологических характеристик асфальтобетонных покрытий автодорог необходимо проектировать композиции с крупным щебнем (до 60%) и максимально плотной микроструктурой. Инновационными направлениями в производстве битумных вяжущих для комплементарного улучшения макромолекулярных наноконпозиций технологических характеристик асфальтобетонных дренажных покрытий автодорог является переход к более объемным и более динамическим тестам.

В реализуемых проектах строительства, реконструкции и содержания автомобильных дорог необходимо проработать механизм импортозамещения битумных материалов и достижения технологического суверенитета в обновлении дорожных машин: грейдеров, асфальтоукладчиков и т.п. Планируется в 2024 году ввести в действие ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Вяжущие нефтяные битумные. Правила выбора марок»; вводимый стандарт будет распространяться на конструктивные слои дорожных покрытий из асфальтобетона, а также устанавливать методику выбора битумных вяжущих, допустимых для применения в слоях с учетом температурных условий эксплуатации асфальтобетонных покрытий и возрастающих транспортных нагрузок.

В 2022 году российскими предприятиями было выпущено более 65 млн тонн асфальтобетонных смесей; лидером производства асфальтобетонных дорожных, аэродромных смесей по России за 2022 год стал

Центральный федеральный округ с долей более 28%; на втором месте – Приволжский федеральный округ (свыше 18%). Актуальным остается строительство в Российской Федерации отечественных битумных терминалов для комплементарного и стабильного функционирования асфальтобетонных заводов. В будущем, в 2024–2030 годах битумный терминал должен не только хранить и отгружать высококачественный битум, но и производить его, т.е. трансформироваться в производственно-логистический комплекс [42].

Дорожное строительство – одна из ключевых отраслей российской экономики, призванных стабилизировать поступательное движение страны в условиях агрессивных санкций и геополитической турбулентности. Санкционные ограничения, которые затронули нефтепереработку, поставки за рубеж в недружественные страны, коснулись и производства нефтяных дорожных битумов. Вертикально интегрированные компании «Роснефть», «Газпром» и др. имеют технологические возможности оптимизировать технологию производства востребованных битумных материалов. В целом, реализация инфраструктурной транспортной стратегии России, в рамках которой производится строительство магистральных трасс, например, М-12 «Москва–Нижний Новгород–Казань» с последующим продлением до Екатеринбурга, потребует увеличение емкости внутреннего битумного рынка: к 2033 году по оптимистичному сценарию достигнет 8,5 млн тонн.

Востребованным трендом в условиях геополитических тормозящих санкций выступает использова-

ние в производстве асфальтобетонов техногенных отходов: шлаков, золы-уноса; разнообразных отходов нефтеперерабатывающей промышленности; искусственных каменных материалов (керамзита, и т.п.); отработанного асфальтобетона и др. [43, 44]. Рекуперационное использование битумно-полимерных рециклированных отходов мягких кровель в строительстве автомобильных дорог является оптимальным подходом решения экологических проблем современности [45]. Резино-полимерно-битумные вяжущие на основе использования резины отработанных покрышек перспективны для наноструктурной модификации битума и конструирования дренажной асфальтобетонной смеси [46, 47].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Добавление в состав битумных композиций модифицирующих полимерных нанокомпозиций является эффективным способом комплементарного синергетического улучшения физико-механических характеристик асфальтобетонов. Битум с модифицирующими макромолекулярными нанодобавками повышает долговечность асфальтобетонных покрытий, срок службы автодорог увеличивается в 2–3 раза. Битумные вяжущие дорожных асфальтобетонов, модифицированные полимерными нанокомпозициями, имеют в упругопластичном состоянии более высокую адгезию и когезию, широкий диапазон термопластичности, высокоэластичности от -60°C до $+100^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2006. 271 с.
2. Руденская И.М., Руденский А.В. Органические вяжущие для дорожного строительства. М.: ИНФРА-М, 2010. 256 с.
3. Тюкилина П.М., Гуреев А.А., Тыщенко В.А. Производство нефтяных дорожных вяжущих. М.: Недра, 2021. 303 с.
4. Пассек В.В., Величко В.П., Андреев В.С. Предотвращение продольных трещин в асфальтобетонном покрытии проезжей части дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2020. № 1(91). С. 25–27.
5. Котенко Н.П., Щерба Ю.С., Евфорицкий А.С. Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // Пластические массы. 2019. № 11–12. С.47–49. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-47-49>
6. Porto M., Caputo P., Loise V., Rossi C.O., Eskandarsefat S, Teltayev B. Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances. *Applied Sciences*. 2019; 9(4): 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
7. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Интерпретация свойств асфальтобетона в дорожном покрытии // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 87–92. 7
8. Грудников И.Б. Нефтяные битумы. Процессы и технологии производства. Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ. 2015. 288 с.
9. Ярцев В.П., Ерофеев А.В. Эксплуатационные свойства и долговечность битумно-полимерных композитов. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2014. 80 с.
10. Усов Б.А., Горбунова Т.Н. Свойства и модификация битумных вяжущих // Системные технологии. 2017. № 22. С. 72–88.
11. Hortal A.R., Martínez-Naya B., Lobato M.D., Pedrosa J.M., Lago S. On the determination of molecular weight distributions of asphaltenes and their aggregates in laser desorption ionization experiments. *Journal of Mass Spectrometry*. 2006; 41(7): 960–968. <https://doi.org/10.1002/jms.1056>

12. Долوماتов М.Ю., Шуткова С.А. Надмолекулярная структура нефтяных асфальтенов «континентального» типа // Журнал структурной химии. 2017. Т. 58, № 7. С. 1311–1316. <https://doi.org/10.1134/S0022476617070022>
13. Hassanzadeh M., Abdouss M. Essential role of structure, architecture, and intermolecular interactions of asphaltene molecules on properties (self-association and surface activity). *Heliyon*. 2022; 8(12): e12170. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12170>
14. Шуткова С.А., Долوماتов М.Ю. Исследование электронной и надмолекулярной структуры нефтяных асфальтенов // Российский электронный научный журнал. 2021. № 2 (40). С. 106–120. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-40-2-106-120>
15. Халиков Р.М., Иванова О.В., Глазачев А.О. Супрамолекулярное улучшение полимерными наноккомпозитами технологических параметров асфальтобетонных дорожных покрытий // Актуальные проблемы техн., естеств. и гуман. наук: Материалы Международ. конф. Уфа: УГНТУ, 2022. С. 432–436.
16. Бочков Н.Н., Алгебраистова Н.К., Шепелев И.И., Жижаев А.М. Исследование гидрофобности активированного минерального порошка с применением пенной флотации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 194–203.
17. Гавер С.В., Урчева Ю.В., Сыроежко А.М., Васильев В.В. Влияние совместимости нефтяных битумов и стирол-бутадиен-стирольных полимеров на дисперсность и эксплуатационные характеристики полимерно-битумных композиций // Известия СПбГТИ (ТУ). 2016. №36. С. 68–71.
18. Евдокимова Н.Г., Лунева Н.Н., Егорова Н.А., Махмутова А.Р., Байгузина Ю.А., Имангулова Э.А. К выбору технологии производства полимерно-битумных вяжущих как инновационных наносвязующих для устройства асфальтобетонных покрытий // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10, № 5. С. 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>
19. Rusakov M.N., Ismailov A. Styrene-butadiene-styrene polymers for road construction in the Russian Federation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 2(87): 23–40. <https://doi.org/10.18720/CUBS.87.3>
20. Хасанов М.Ф., Латыпова З.Б., Халиков Р.М. Влияние термодинамических факторов на самосборку наноструктур макромолекул // В мире научных открытий. 2010. № 4-10(10). С. 8–9.
21. Поляков И.В., Баранников М.В., Поляков В.С. Модификация дорожных битумов добавками на основе деструктурированных полимеров // Химическая промышленность сегодня. 2021. № 2. С. 46–49.
22. Небрятенко Д.Ю., Лушников Н.А. Полимерные модификаторы битума: бутадиен-стирольный термоэластопласт и синдиотактический полибутадиен // Вестник ВСГУТУ. 2022. №2(85). С. 78–86. https://doi.org/10.53980/24131997_2022_2_78
23. Евдокимова Н.Г., Егорова Н.А., Султанова Д.П., Кунаккулова Э.М., Сережкина Н.Г. Формирование золь-гелевой наноструктуры дорожных битумов методом подбора группового химического состава // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11, № 5. С. 512–525. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-512-525>
24. Пудовкин А.Н., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Соколова В.В., Недосеко И.В. Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 3–4. С. 103–113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113>
25. Игнатъев А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. № 1.(63). С. 14–30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14
26. Dong F., Yang P., Yu X., Jiang M., Wang S., Zu Y., Chen B., Wang J. Morphology, chemical reaction mechanism, and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer. *Construction and Building Materials*. 2023; 378: 131204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131204>
27. Crucho J., Picado-Santos L., Neves J., Capitão S. A review of nanomaterials' effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019; 9(18): 3657. <https://doi.org/10.3390/app9183657>
28. Халиков Р.М., Ведерникова Т.Г., Шарипов Р.А., Рашидова С.Т., Борисов И.М. Синергетический динамизм формирования надмолекулярных структур полимеров // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2008. Т. 51, № 11. С. 92–94.
29. Калгин Ю.И., Комаров Е.В. Модифицированный бутадиен-стирольный термоэластопласт и полимерные добавки для дорожного строительства // Известия вузов. Строительство. 2020. № 9(741). С. 58–67.
30. Кременецкая Е.В., Горячев М.В., Игошин Ю.Г., Коробицын А.Ю. Полимерно-битумный вяжущий материал и способ его получения // Патент РФ №2412223. Опубл. 20.02.2011.
31. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Модифицированные битумные вяжущие строительного назначения // Строительные материалы. 2009. № 8. С. 50–51.
32. Горбатова В.Н., Гордеева И.В., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Никольский В.Г., Егоров В.М. Влияние активного порошка дискретно девулканизированной резины на низкотемпературные свойства битума // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-72-83>
33. Мамулат С.Л., Мамулат Ю.С. Актуальные задачи модификации битумных вяжущих для увеличения срока службы дорожных покрытий // Дороги. Инновации в строительстве. 2019. № 80. С. 70–74.
34. Иноземцев С.С., Королев Е.В., До Т.Ч. Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 58–69. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-58-69>
35. Гриневич Н.А. Проектирование состава дорожного асфальтобетона. Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 36 с.

36. Крупин Н.В. Современные тенденции в технологиях асфальтобетонных покрытий // Дороги. Инновации в строительстве. 2022. № 100. С. 12–15.
37. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Янковский Л.В. Применение кубовидного литого шлакового щебня для строительства и ремонта магистральных лесных дорог // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 10. С. 11–16.
38. Иванова О.В., Халиков Р.М., Салов А.С., Низамутдинов М.Х., Зиннатуллин В.В. Технологичное управление обходом для 3D-аддитивной печати строительных наноконструкций // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 2. С. 117–123. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-117-123>
39. Борисенко Ю.Г., Рудак С.В. Влияние содержания и зернового состава легких пористых заполнителей на эксплуатационные характеристики битумо-минеральных композиций // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 15(67). С. 101–110.
40. Глазачев А.О., Шерстобитова Т.М., Ахметшин Р.М. Преимущества использования статического зондирования в строительстве // Новая наука: теоретический и практический взгляд: материалы Международ. конф. Нефтекамск: НИЦ «Мир науки», 2020. С. 58–66.
41. Боброва Т.В. Актуализация параметров информационной модели дорожно-строительного потока при разработке проекта производства работ // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19, № 6. С. 916–927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>
42. Гуреев А.А., Тюкилина П.М., Нгуен Т.Т.И. О проблемах производства и потребления нефтяных дорожных вяжущих материалов в Российской Федерации // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2018. № 1(290). С. 110–128.
43. Поляков И.В., Баранников М.В., Поляков В.С. Использование полимерсодержащих отходов производства термопластов для модификации нефтяных битумов // Промышленное производство и использование эластомеров. 2020. № 2. С. 28–33. <https://doi.org/10.24411/2071-8268-2020-10205>
44. Фомина Н.Н., Хозин В.Г. Компатибилизация смесей полимеров при переработке отходов изделий из термопластов // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 229–236. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-229-236>
45. Халиков Р.М., Иванова О.В., Короткова Л.Н., Салов А.С. Эффективное использование в конструировании дорожных покрытий автодорог рециклированных полимерных отходов // The Scientific Heritage. 2021. № 68-1. С. 62–66. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-68-1-62-66>
46. 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>
47. 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. V. 15. No. 5. 4398. <https://doi.org/10.3390/su15054398>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глазачев Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, anton.glazachev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4036-3155>

Иванова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, olgachemist@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6678-8369>

Синицин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, d4013438@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3780-2800>

Ахметшин Ранис Мидхатович – старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», архитектурно-строительный институт, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, ranisahmetshin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3269-3596>

ВКЛАД АВТОРОВ

Глазачев Антон Олегович – научное руководство; итоговые выводы.

Иванова Ольга Владимировна – концепция исследования; написание исходного текста; доработка и перевод текста.

Синицин Дмитрий Александрович – концепция исследования; написание исходного текста.

Ахметшин Ранис Мидхатович – сбор материала; участие в разработке материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 05.10.2023; принята к публикации 09.10.2023.