

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.537: 620.22

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54

Супрамолекулярное улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий дорог структурирующими добавками функциональных полимеров

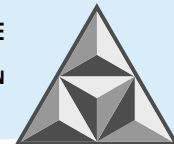
А.И. Недосеко, Р.М. Халиков, С.Ю. Павлов, А.О. Глазачев

**Андрей Игоревич Недосеко¹, Рауф Музагитович Халиков^{1,*}, Станислав Юрьевич Павлов^{1,2},
Антон Олегович Глазачев¹**

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация,

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация,

nedoseko01@mail.ru¹, rauf_khalikov@mail.ru^{1,}, sta227@yandex.ru^{1,2}, anton.glazachev@mail.ru¹*



Предлагаются актуальные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий. При введении в битумный компонент структурирующих добавок функциональных полимеров – бутадиен-стирольных сополимеров удается уменьшить температурную чувствительность асфальтобетонного покрытия, повысить его твердость в летний сезон и снизить хрупкость зимой. Оптимизированное добавление полимерных модификаторов приводит к формированию устойчивых надмолекулярных (супрамолекулярных) комплексов асфальтобетона. На качество готовой композиции существенно влияют характеристики всех компонентов – минерального порошка, песка, щебня, битумного вяжущего и макромолекулярных добавок функциональных полимеров. В процессе приготовления асфальтобетонной смеси важно поддерживать постоянные параметры процесса (температура, интенсивность перемешивания и др.). Супрамолекулярная взаимодействующая трехмерная сетка, формируемая в битумном вяжущем с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает дорожным покрытиям дополнительную прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям в интервале температур от -70°C до $+90^{\circ}\text{C}$. Асфальтобетонные покрытия на основе модифицированных полимерно-битумных вяжущих увеличивают работоспособность дорожного полотна автомагистралей и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колеи).

Ключевые слова: автомобильная дорога, дорожный битум, функциональные полимеры, асфальтобетонные покрытия

Для цитирования:

Недосеко А.И., Халиков Р.М., Павлов С.Ю., Глазачев А.О. Супрамолекулярное улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий дорог структурирующими добавками функциональных полимеров // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 43-54. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54

Supra-molecular improvement of the performance characteristics of asphalt concrete road surfaces by structuring additives of functional polymers

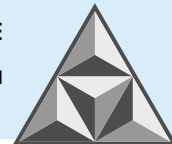
A.I. Nedoseko, R.M. Khalikov, S.Yu. Pavlov, A.O. Glazachev

**Andrey Igorevich Nedoseko¹, Rauf Muzagitovich Khalikov^{1,*}, Stanislav Yurievich Pavlov^{1,2},
Anton Olegovich Glazachev¹**

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

nedoseko01@mail.ru¹, rauf_khalikov@mail.ru^{1,}, sta227@yandex.ru^{1,2}, anton.glazachev@mail.ru¹*



The article proposes relevant technical and technological solutions that increase the durability of asphalt concrete road pavements. By introducing functional polymer additives – butadiene-styrene copolymers – into the bitumen component, it is possible to reduce the temperature sensitivity of asphalt concrete pavements, increase their hardness in the summer season and reduce their brittleness in winter. The optimised addition of polymer modifiers contributes to the formation of stable supramolecular complexes in asphalt concrete. The quality of the finished composition is significantly affected by the characteristics of all components - mineral powder, sand, crushed stone, bituminous binder and macromolecular additives of functional polymers. During the preparation of the asphalt concrete mixture, it is important to maintain constant process parameters (temperature, mixing intensity, etc.). A supramolecular complementary three-dimensional network formed in the bituminous binder with the participation of composite butadiene-styrene copolymers gives road surfaces additional strength, wear resistance, heat resistance and the ability to undergo highly elastic deformations in the temperature range from -70°C to +90°C. Asphalt concrete pavements based on modified polymer-bitumen binders increase the performance of motorway roadbeds and resistance to plastic deformation (shearing, rutting).

Keywords: road, road bitumen, functional polymers, asphalt concrete coatings

For citation:

Nedoseko A.I., Khalikov R.M., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. Supra-molecular improvement of the performance characteristics of asphalt concrete road surfaces by structuring additives of functional polymers // Smart Composite in Construction. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 43-54.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54



ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги, как и другие транспортные сооружения, рассчитаны на определенный срок эксплуатации, в течение которого они подвергаются интенсивным нагрузкам от наземного транспорта и воздействию погодных-климатических факторов. На всех автомагистралях Российской Федерации, особенно в мегаполисах, нерешенными остаются проблемы, которые связаны с быстрым износом асфальтобетонного дорожного покрытия из-за появления разрушений. Выбоины, неровности, трещины и ямы во многом связаны с ростом грузоперевозок. Среди традиционных и разрабатываемых способов улучшения качества дорожного полотна достаточно эффективным является введение различных добавок в асфальтобетонную смесь [1].

Главные недостатки основного вяжущего вещества в асфальтобетоне (дорожный битум) – атмосферная термоокислительная деструкция и низкая деформационная устойчивость при колебаниях температуры (охрупчивание в зимний период и оплывание, колеобразование в летний период). Для увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий транспортных магистралей, за счет повышения водостойкости и сдвигоустойчивости, разработаны модифицированные битумные вяжущие, среди которых следует выделить полимерно-битумные композиции [2, 3]. Взаимодополняющее (комплементарное) введение функционального полимера в состав дорожного битума увеличивает износостойкость дорог, сокращает финансовые расходы на их эксплуатацию. Применение асфальтобетонных смесей с полимерно-битумными вяжущими увеличивает работоспособность покрытий дорожного полотна и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колеи) при действии высоких и низких температур.

Цель работы – поиск технологичных подходов к улучшению эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий за счет введения в них адгезионных и структурирующих добавок функциональных взаимодополняющих полимеров.

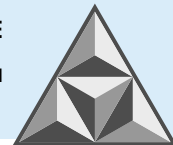
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Метод приготовления битума, модифицированного функциональными полимерами, сводится к следующему. Нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100 (Новыйл, Уфа) нагревали до 165-180°C в гидродинамических смесителях со скоростью 120-150 мин⁻¹. Далее порциями добавляли измельченный бутадиен-стирольный сополимер СБС 330Л (Сибур, Воронеж) в количестве 3.5% (по массе), затем увеличивали интенсивность оборотов до 750-800 мин⁻¹ и перемешивали 50-60 мин при температуре 170°C до получения гомогенной композиции.

Битумные вяжущие оценивали по ГОСТ 33133-2014:

- пенетрация (глубина проникновения иглы);
- температура размягчения (по кольцу и шару);
- растяжимость.

Эти характеристики в дальнейшем определяют большинство технологических параметров дорожных асфальтобетонов. С помощью дуктилометра ДАБ-150 при температуре 25°C (характеризует технологические характеристики трехмерной наносетки) и 0°C (работоспособность при низких температурах) определяли эластичность композиций. Результаты испытаний физико-механических показателей битумных вяжущих после введения в них структурирующих добавок функциональных полимеров приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Физико-механические параметры исходного и модифицированного битумного вяжущего марки БНД 70/100**Table 1.** Physical and mechanical parameters of the initial and modified bitumen binder grade PRB 70/100

Количество полимерной добавки, % от массы битума	Пенетрация		Температура размягчения, °С	Растяжимость	
	при 25°C, 0.1 мм	при 0°C, 0.1 мм		при 25°C, см	при 0°C, см
0	85	24	49	95.2	3.8
3.5	58	28	70	74.5	14.0

Добавление полимерных функциональных модификаторов приводит к увеличению температуры размягчения и снижению температуры хрупкости битумных вяжущих за счет формирования устойчивых надмолекулярных (супрамолекулярных) комплексов. Минеральный каркас асфальтобетона формировали из смеси карбонатного минерального порошка МП-1, дробленного песка и щебня (фракция 5-10 мм) с соответствующим гранулометрическим составом по ГОСТ 32761-2014 и ГОСТ 33029-2014. Асфальтобетонную смесь готовили смешиванием по ГОСТ Р 58406.1-2020 полимерно-битумного вяжущего (7 мас%) в нагретом состоянии, минерального порошка (12 мас%), песка (16 мас%) и щебня (остальное). Испытания асфальтобетонного дорожного покрытия проводили по методикам, контролирующим технологические характеристики битумно-минеральных композиций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гибкие бутадиеновые и жесткие стирольные блоки полимеризуются в форме многообразных сополимеров, где полистирольные домены размерами 0.4-0.7 мкм выполняют в макромолекуле роль функции надмолекулярных узлов вулканизационной наносетки. Композитные бутадиен-стирольные сополимеры с молярной массой $\sim 10^5$ за счет набухания и частичного растворения в ароматических углеводородах битумов достаточно хорошо совмещаются с битумными дорожными вяжущими при температуре 175°C [4, 5]. Термопластичные блок-сополимеры вводят в состав битумных вяжущих в гранулированном виде, а для технологического улучшения совместимости модифицирующих сополимеров и вяжущего используют пластификаторы – индустриальные масла, межфазные компатибилизаторы и др.

Взаимодополняющая супрамолекулярная пространственная сетка, образующаяся в битуме с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает достаточно высокую прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям [6] асфальтобетонным дорожным покрытиям в интервале температур от -80°C до +90°C; это особенно заметно в условиях роста интенсивности движения большегрузных автомобилей. Следует отметить, что для производства модифицированных полимерно-битумных вяжущих необходимо улучшить их адгезию к поверхности комплементарных минеральных наполнителей. Высокие показатели адгезии модифицированного битума свидетельствуют о способности удерживаться на поверхности заполняющих материалов при разрушающем воздействии воды. Характеристики основных компонентов (песок, щебень, минеральный порошок, макромолекулярно-битумное вяжущее), а также параметры технологического процесса учитываются как критерии при управлении качеством готовой асфальтобетонной смеси. Пустотность щебня и остаточная пористость



минеральных компонентов уплотненного асфальтобетона колеблются в необходимых пределах; другие характеристики асфальтобетона также соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020.

Различные виды асфальтобетонов для дорожных покрытий отличаются по составу сырьевых материалов, технологии изготовления и физико-механическим свойствам. Векторы супрамолекулярного улучшения дорожных асфальтобетонных композиций путем введения различных добавок направлены на обеспечение «умного» самозалечивания микротрещин автодорожного покрытия, самоочищения зимних снежно-ледяных отложений и др. [7]. Температурная устойчивость характеризуется способностью асфальтобетона противостоять резким перепадам погоды: в модифицированном асфальтобетоне термомеханические свойства изменяются более плавно – от пластичных (при высоких температурах) до хрупких (при низких температурах). Это повышает стабильность покрытий к сдвиговым деформациям и образованию трещин.

Взаимодополняемые макромолекулы блок-сополимеров стирола и бутадиена, содержащие функциональные группы, за счет различных связей (ван-дер-Ваальсовых, водородных, гидрофобных, ион-дипольных и электростатических) обеспечивают большое число межмолекулярных контактов, определяющих динамику надмолекулярного структурообразования [8] прочных асфальтобетонных покрытий (рис. 1).

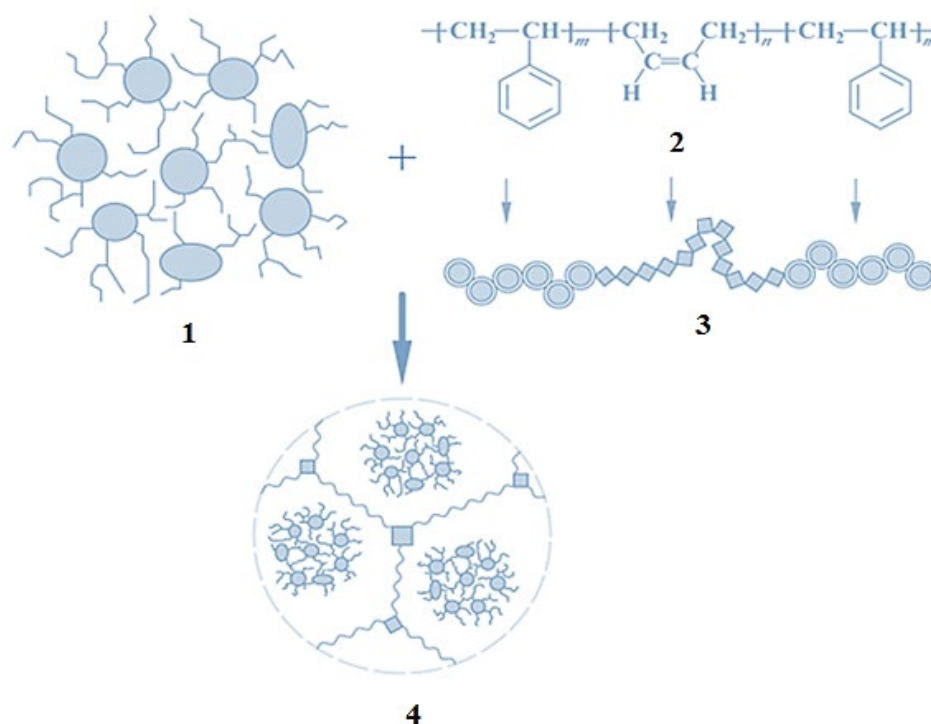
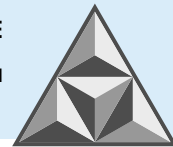


Рис. 1. Схема формирования микроструктуры битумных вяжущих, модифицированных бутадиен-стирольными сополимерами: 1 – битумный нанокластер; 2 – фрагмент макромолекулы бутадиен-стирола; 3 – линейная цепь сополимера; 4 – трехмерная сетка полимерно-битумного вяжущего

Fig. 1. Scheme of microstructure formation in bituminous binders modified by butadiene-styrene copolymers:

1 – bitumen nanocluster; 2 – fragment of a macromolecule of a styrene-butadiene;
3 – linear chain of the copolymer; 4 – three-dimensional polymer bitumen binder mesh

Модифицированное бутадиен-стирольными сополимерами битумное вяжущее – супрамолекулярная матрица хорошо адсорбируется на шероховатой поверхности частиц тонкомолотых минеральных порошков. При оптимальном соотношении улучшенных битумов и минеральных наполнителей резко усиливается трещиностойкость в зоне обратимых



деформаций. При совместном воздействии механических нагрузок, колебаний температур и агрессивных сред диффузия разрушающих агентов в контактную зону между минеральным наполнителем и пленкой битумного вяжущего является главным доминирующим фактором появления и фрактального роста микротрещин в асфальтобетонном дорожном покрытии.

Пределы прочности на сжатие асфальтобетона при температурах $+50^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$ и 0°C являются наиболее воспроизводимыми показателями температурной устойчивости. Минимальное значение этого показателя при $+50^{\circ}\text{C}$ – не менее 0.9 МПа (характеризует способность асфальтобетонного покрытия противостоять сдвиговым деформациям), а максимальное – не более 12.0 МПа при 0°C . При современном строительстве автотрасс I категории в качестве структурирующих функциональных полимерных добавок щебеночно-мастичных асфальтобетонов используют, как правило, гранулированное целлюлозное волокно.

В дисперсионной среде битумных вяжущих макромолекулярные бутадиен-стирольные сополимеры формируют трехмерную наносетку и существенно усиливают эластичность. Это характеризует способность вяжущего к обратимым эластическим деформациям; одновременно снижается температура хрупкости и повышается температура размягчения. Изучение реологических свойств дорожного битума (в частности, динамической вязкости при 60°C) со структурирующими добавками функциональных полимеров позволяет оценить их влияние на микроструктуру асфальтобетонной смеси, а в дальнейшем – выбрать оптимальное их сочетание и дозировку, получить вяжущее с требуемыми характеристиками (устойчивость к колееобразованию, повышенная уплотняемость в процессе укладки при пониженных температурах).

В процессе изготовления улучшенных функциональными добавками асфальтобетонных смесей осуществляют постоянный контроль процесса и оперативные испытания образцов покрытий. Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси [9] позволяет эффективно выработать наиболее подходящий вариант функционирования технологической линии.

Следует также отметить, что для обеспечения повышенной устойчивости к сдвигу и образованию трещин в асфальтобетонных покрытиях в качестве армирующих компонентов используют стекловолокно, полимерные фибры и др. [10]. Использование адгезионных сополимерных добавок облегчает формирование прочных связей между вяжущим и армирующими компонентами, уменьшает эрозионное отслаивание и усиливает гидроизолирующие характеристики асфальтобетона.

Отметим также, что решающее влияние на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий оказывают межфазные процессы, которые протекают на поверхности зерен минерального порошка при его взаимодействии с модифицированным стирол-бутадиеновыми добавками битумным вяжущим. Разрушение по контактной межфазной зоне происходит из-за малой когезионной прочности макромолекулярной битумной микропленки и недостаточной адгезии битумного вяжущего к поверхности минеральных компонентов асфальтобетона. Введение структурирующих добавок полимеров в битум (рис. 2) обеспечивает уплотнение поверхности асфальтобетона (на это указывает растровая микрофотография, снятая на электронном микроскопе JEOL JSM-6), а также заметное расширение температурного интервала пластичности и деформируемости асфальтобетона.

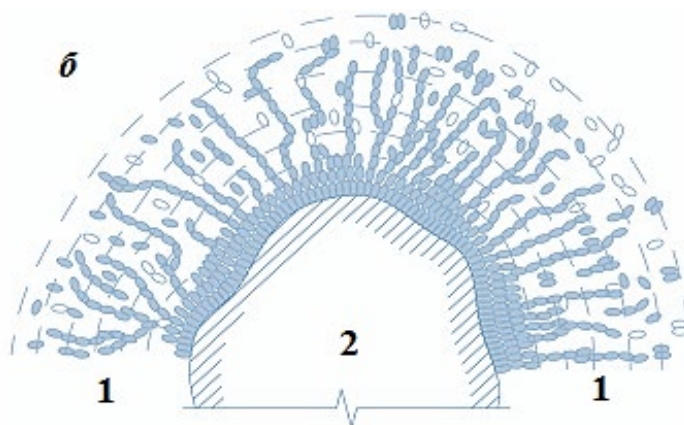
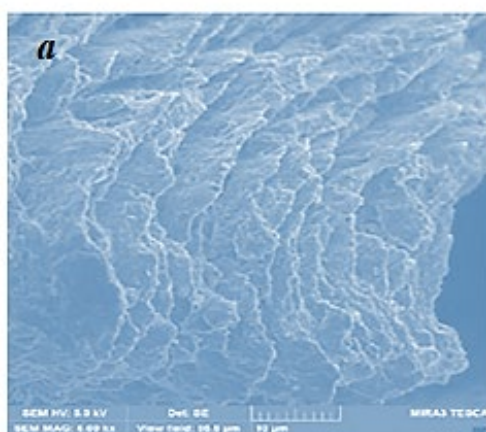


Рис. 2. Микрофотография асфальтобетона (а); схема межфазового взаимодействия битумно-полимерного вяжущего (1) с поверхностью минерального наполнителя и щебня (2) в асфальтобетоне (б)

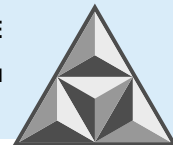
Fig. 2. Micrograph of asphalt concrete (a); scheme of interphase interaction of bitumen polymer binder (1) with the surface of mineral filler and crushed stone (2) in asphalt concrete (b)

Модифицированный полимерами дорожный битум обладает необходимой адгезией к поверхности наполнителей, что обеспечивает требуемую водостойкость и продолжительную эксплуатацию асфальтобетонного покрытия без эрозии. Взаимодополняющая активация минерального порошка асфальтобетонной смеси влияет на износостойкость дорожных покрытий [11]. Адгезионные супрамолекулярные взаимодействия приводят к фрактальной хемосорбции на шероховатой поверхности минеральных компонентов асфальтовых нанокластеров.

К супрамолекулярным полимерным компонентам, используемым для функционального улучшения дорожных битумов, предъявляется ряд технико-экономических требований: хорошая совместимость с битумным вяжущим; температурный диапазон высокоэластичности от -70°C до $+100^{\circ}\text{C}$; низкая стоимость. Реологические и физико-механические характеристики асфальтобетонных покрытий автодорог в значительной степени зависят от качества и оптимального соотношения в смеси битума и минеральных компонентов. В процессе технологического приготовления и транспортировки асфальтобетонных смесей к месту укладки, кроме воздействия температуры ($165\text{--}180^{\circ}\text{C}$), разнонаправленное влияние оказывают межфазовые явления в пограничных слоях контакта полимерно-битумного вяжущего и минерального заполнителя, а в эксплуатируемом асфальтобетоне дорожного полотна – разрушающие климатические и физико-механические факторы.

При строительстве новых скоростных автомагистралей с высокой транспортной интенсивностью в 2024 г. в Российской Федерации использовано более 1.2 млн. т модифицированного битума. Срок эксплуатации автодорожных покрытий с использованием полимер-асфальтобетонов превышает время применения традиционных покрытий на 50%.

Востребованным трендом для реализации национального проекта России «Инфраструктура для жизни» выступает также использование в производстве асфальтобетонов техногенных отходов – шлаков, золы-уноса, отходов нефтеперерабатывающей промышленности и др. [12, 13]. В качестве макромолекулярных улучшителей технологических характеристик асфальтобетонных дорожных покрытий могут использоваться структурирующие добавки изотактического полипропилена, вторичного полиэтилентерефталата и др. [14].



ВЫВОДЫ

Использование битумного вяжущего, улучшенного структурирующими добавками функциональных стирол-бутадиеновых сополимеров, повышает долговечность асфальтобетонных покрытий в 1.5 раз. Супрамолекулярная взаимодополняющая трехмерная сетка, которая формируется в битумном вяжущем с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает асфальтобетонным дорожным покрытиям высокую прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям в интервале температур от -70°C до +90°C.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **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>.
2. **Porto M., Caputo P., Loise V., Rossi C.O., Eskandarsefat S., Teltayev B.** Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9. № 4. P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
3. **Тимрот С.Д., Калаева С.З. кзы, Маркелова Н.Л., Калаев Р.Э.** Модифицирующая добавка для повышения качества асфальтобетона // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5. Вып. 2. С. 51-61. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61.
4. **Халиков Р.М., Иванова О.В., Глазачев А.О.** Супрамолекулярное улучшение полимерными нанокompозитами технологических параметров асфальтобетонных дорожных покрытий // *Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: Мат. Межд. конф.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. С. 432-436.
5. **Небратенко 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.
6. **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 Mat.* 2023. Vol. 378. P. 131204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131204>.
7. **Игнатьев А.А.** Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // *Известия КГАСУ*. 2023. № 1 (63). С. 14-30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14.
8. **Халиков Р.М., Ведерникова Т.Г., Шарипов Р.А., Рашидова С.Т., Борисов И.М.** Синергетический динамизм формирования надмолекулярных структур полимеров // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2008. Т. 51. № 11. С. 92-94.
9. **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>.
10. **Калгин Ю.И., Комаров Е.В.** Модифицированный бутадиен-стирольный термоэластопласт и полимерные добавки для дорожного строительства // *Изв. вузов. Строительство*. 2020. № 9 (741). С. 58-67. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-58-67.
11. **Глазачев А.О., Павлов С.Ю., Иванова О.В., Халиков Р.М.** Синергетические технологии конструирования износостойких слоев асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // *Тенденции развития науки и образования*. 2024. № 106-9. С.22-25. DOI 10.18411/trnio-02-2024-481.
12. **Недосеко А.И., Халиков Р.М.** Ресурсосберегающие технологии использования золошлаковых отходов в региональном строительстве транспортных сооружений // *Проблемы строительного комплекса России: Мат. XXIX Межд. конф.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2025. С. 370-373.
13. **Crucho J., Picado-Santos L., Neves J., Capitão S.** A review of nanomaterials effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures // *Appl. Sci.* 2019. № 9 (18). P. 3657. <https://doi.org/10.3390/app9183657>.



14. **Игнатьев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М.** Структурообразование и потребительские свойства гранулированных асфальтобетонных смесей с включением фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 1 (105). С. 123-132. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-123-132.

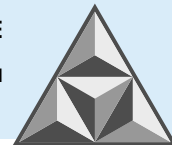
Поступила в редакцию 27.08.2025

Одобрена после рецензирования 31.10.2025

Принята к опубликованию 12.12.2025

REFERENCES

1. **Kotenko, N.P., Shcherba, Yu.S. and Evforitskiy, A.S.** (2019), "Effect of polymer and functional additives on the properties of bitumen and asphalt-concrete", *Plasticheskie massy*, no. 11-12, pp. 47-49 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-47-49>.
2. **Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Rossi, C.O., Eskandarsefat, S. and Teltayev, B.** (2019), "Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances", *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, p. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
3. **Timrot, S.D., Kalaeva, S.Z. kzy, Markelova, N.L. and Kalaev, R.E.** (2024), "A modifying additive for asphalt concrete quality improvement", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 2, pp. 51-61. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61 (in Russian).
4. **Khalikov, R.M., Ivanova, O.V. and Glazachev A.O.** (2022), "Supramolecular improvement of technological parameters of asphalt concrete road surfaces by polymer nanocomposites", *Act. probl. of techn., natur. and human. sci.: Mat. Inter. conf.* Ufa: USPTU, pp. 432-436 (in Russian).
5. **Nebratenko, D.Yu. and Lushnikov, N.A.** (2022), "Polymer bitumen modifiers: butadiene-styrene thermoplastic and syndiotactic polybutadiene", *Bull. VSGUT*, vol. 2, no. 85, pp. 78-86. https://doi.org/10.53980/24131997_2022_2_78 (in Russian).
6. **Dong, F., Yang, P., Yu, X., Jiang, M., Wang, S., Zu, Y., Chen, B. and Wang, J.** (2023), "Morphology, chemical reaction mechanism, and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer", *Construction and Building Materials*, vol. 378, p. 131204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131204>.
7. **Ignatyev, A.A.** (2023), "Additives in asphalt concrete. Literature rev.", *Izv. KGASU*, vol. 1, no. 63, pp. 14-30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14 (in Russian).
8. **Khalikov, R.M., Vedernikova, T.G., Sharipov, R.A., Rashidova, S.T. and Borisov, I.M.** (2008), "Synergetic dynamism of formation of supramolecular structures of polymers", *ChemChemTech.*, vol. 51, no. 11, pp. 92-94 (in Russian).
9. **Pudovkin, A.N., Khalikov, R.M., Bulatov, B.G., Sokolova, V.V. and Nedoseko, I.V.** (2021), "Digital control of parameters in the automated control system for the production of asphalt concrete mixtures", *Electrotech. and inform. complexes and systems*, vol. 17, no. 3-4, pp. 103-113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113> (in Russian).
10. **Kalgin, Yu.I. and Komarov, E.V.** (2020), "Modified styrene butadiene thermoplastic and polymer additives for road construction", *Izv. vuzov. Construction*, vol. 9, no. 741, pp. 58-67. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-58-67 (in Russian).
11. **Glazachev, A.O., Pavlov, S.Yu., Ivanova, O.V. and Khalikov, R.M.** (2024), "Synergetic technologies for designing wear-resistant layers of asphalt-concrete road coverings", *Trends in the development of science and education*, no. 106-9, pp. 22-25 (in Russian). DOI 10.18411/trnio-02-2024-481.
12. **Nedoseko, A.I. and Khalikov, R.M.** (2025), "Resource-saving technologies for the use of ash and slag waste in the regional construction of transport facilities", *Problems of the Russian construction complex: Mat. XXIX Inter. Conf.* Ufa: Publ. USPTU, pp. 370-373 (in Russian).
13. **Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J. and Capitão, S.** (2019), "A review of nanomaterials effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures", *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, p. 3657. <https://doi.org/10.3390/app9183657>.



14. **Ignatyev, A.A., Razgovorov, P.B. and Gotovtsev, V.M.** (2023), "Structure formation and consumer properties of granular asphalt-concrete mixtures with phosphogypsum inclusion and secondary polyethylene terephthalate", *Construction and reconstruction*, vol. 1, no. 105, pp. 123-132. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-123-132 (in Russian).

Received 27.08.2025

Approved 31.10.2025

Accepted 12.12.2025