



Влияние структурообразующей модифицирующей добавки Plastobit на основе синтетических восков на физико-механические показатели битума и асфальтобетона

К.Ю. Тюрюханов^{1,2}, С.А. Иванов³✉

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет

им. академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

Аннотация. Целью данной работы является исследование изменения физико-механических характеристик органических вяжущих модифицированных добавками на основе синтетических восков, влияние их на полидисперсные органоминеральные композиции (асфальтобетоны). Такие национальные проекты, как «Безопасные качественные дороги», «Формирование комфортной городской среды» направлены на доведение до нормативных показателей транспортно-эксплуатационных характеристик, восстановление и усовершенствование дорог общего пользования и улично-дорожной сети, а также развитие крупнейших городских агломераций. Применение модифицирующей добавки позволит им продлить межремонтные сроки автомобильной дороги, снизить развитие пластических деформаций. Используя известные методы и современное научно-техническое лабораторное оснащение были проведены сравнительные испытания, которые позволили выявить закономерности изменения физических и эксплуатационных характеристик полидисперсных органоминеральных композиций. На основании проведенных исследований и полученных лабораторных результатов были сформулированы и даны рекомендации применения модифицирующей добавки, что нашло отражение в практическом применении на объектах реконструкции и ремонта автомобильных дорог при устройстве верхних слоев покрытий.

Ключевые слова: структура, синтетический воск, органоминеральная полидисперсная композиция, модифицированный битум, асфальтобетон

Для цитирования: Тюрюханов К.Ю., Иванов С.А. Влияние структурообразующей модифицирующей добавки Plastobit на основе синтетических восков на физико-механические показатели битума и асфальтобетона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 526–538. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-526-538>. EDN: QMBVSC.

Original article

The effect of the structure-forming modifying additive Plastobit based on synthetic waxes for the physical and mechanical properties of bitumen and asphalt concrete

Kirill Yu. Tyuryukhanov^{1,2}, Sergey A. Ivanov³✉

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

³Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia.

Abstract. The purpose of this work is to study the changes in the physico-mechanical characteristics of organic binders modified with additives based on synthetic waxes, their effect on polydisperse organomineral compositions (asphalt concrete). National projects such as "Safe, high-quality roads" and "Creating a comfortable urban environment" are aimed at bringing transport and operational characteristics up to standard, restoring and improving public roads and the road network, as well as developing

the largest urban agglomerations. The use of a modifying additive will allow them to extend the inter-repair time of the highway and reduce the development of plastic deformations. Using well-known methods and modern scientific and technical laboratory equipment, comparative tests were carried out, which made it possible to identify patterns of change in the physical and operational characteristics of fine organomineral compositions. Based on the studies carried out and the laboratory results obtained, recommendations for the use of a modifying additive were formulated and given, which was reflected in practical application at the facilities of reconstruction and repair of highways during the installation of the upper layers of coatings.

Keywords: structure, synthetic wax, organomineral polydisperse composition, modified bitumen, asphalt concrete.

For citation: Tyuryukhanov K.Yu., Ivanov S.A. The effect of the structure-forming modifying additive Plastobit based on synthetic waxes for the physical and mechanical properties of bitumen and asphalt concrete. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):526-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-526-538>. EDN: QMBVSC.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России идет процесс перехода проектирования зерновых составов полидисперсных органоминеральных композиций (асфальтобетонов) от ГОСТ 9128-2013¹ к методологии по Маршаллу ГОСТ Р 58406.1-2020², ГОСТ Р 58406.2-2020³ и методологии «Объемно-функциональному проектированию» ГОСТ Р 58401.1-2019⁴, ГОСТ Р 58401.2⁵.

Важно отметить, что отличительная особенность между подходами проектирования зерновых составов асфальтобетонных смесей заключается в оценке качества не от физико-механических, а от качества органических вяжущих, применяемых инертных и материалов, объемных свойств асфальтобетонов.

Так как физико-механические характеристики инертных материалов и их химический состав, структура и поведение при определенных нагрузках уже в достаточной мере изучены [1–5], повлиять на конечный продукт и его характеристики представляется возможным за счет органического вяжущего (битума нефтяного дорожного) и разновидностей его модификации.

На протяжении многих десятилетий органические вяжущие (ОВ) использовались в качестве защитных покрытий, гидроизоляций крыш и как связующий (склеивающий) элемент в органоминеральных композициях (ас-

фальтобетонах). Существует и ряд других применений, свидетельство которых отражено в справочнике по битумам одной из крупнейших организаций нефтегазовой отрасли⁶.

Исторически, органические вещества получали из природных битумных залежей, которые располагались на поверхности земли [6, 7]. С развитием нефтегазовой промышленности ОВ стали получать в результате переработки сырой нефти, а точнее остатков вакуумной дистилляции, которые подвергаются процессам окисления воздухом и дальнейшего компаундирования.

Состав ОВ может быть одинаковым. В него входят смесь алифатических, ароматических, нафтеновых углеводородов, малое количество органических кислот, оснований и гетероциклических компонентов, но пропорции каждого вещества всегда отличаются. Это приводит к разным физико-механическим характеристикам готового продукта. Трудности возникают в определении точного химического состава из-за его постоянной изменчивости, от месторождения добытой исходной сырой нефти, транспортировки, способа переработки и т. д. Структуру и химический состав ОВ можно представить в виде трех основных компонентов:

– асфальтены – наиболее высокомолекулярная фракция ОВ;

¹ГОСТ 9128-2013. Смесей асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия.

²ГОСТ Р 58406.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей щебеночно-мастичные и асфальтобетон. Технические условия.

³ГОСТ Р 58406.2-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия.

⁴ГОСТ Р 58401.1-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования.

⁵ГОСТ Р 58401.2-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Система объемно-функционального проектирования. Технические условия.

⁶Read J., Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook. London: Thomas Telford Publishing, 2003. 472 p.

– мальтены, которые представлены смолами – с меньшей молекулярной массой, отвечающие за растяжимость;

– масла – ароматическая, самая легкая фракция ОВ, отвечающая за вязкость и скорость старения ОВ, насыщенными углеводородами (рис. 1).

На сегодняшний день, в условиях ограниченных рыночных отношений, многие производители модифицирующих добавок для органических вяжущих (битумов) перестали поставлять свою продукцию в Россию. Однако многими публикациями подтверждена эффективность использования модификаторов разного происхождения и влияния на разные критерии оценки как битума, так и полидисперсных органоминеральных композиций (асфальтобетонов) [8–15].

Однако добавление модифицирующих добавок (МД) может улучшить одни характеристики битума и ухудшить другие. При анализе результатов потребитель обращает внимание на базовые основные критерии оценки ОВ, которые установлены государственными стандартами, такие как пенетрация, дуктильность, температура размягчения, температура

вспышки, динамическая вязкость, растяжимость, температура хрупкости, реологическая устойчивость. Но никто не задается вопросом о равномерности распределения МД, сохранности структуры и свойств модифицированного ОВ в процессе транспортировки или хранения, протекания процессов старения и долговечности органического вяжущего в асфальтобетонах. Проведя лабораторные исследования и опираясь на уже полученные знания, можно конкретизировать и описать процесс структурообразования в модифицированном битуме при вводе МД.

Цель исследования – установить закономерности изменения физико-механических характеристик ОВ при вводе структурно модифицирующей добавки на основе синтетического воска, имеющего линейную структуру молекулярной цепи с определенной степенью кристалличности. Определить степень влияния модифицированного органического вяжущего на физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона. А также роль модифицирующей добавки при комплексной модификации органического вяжущего.

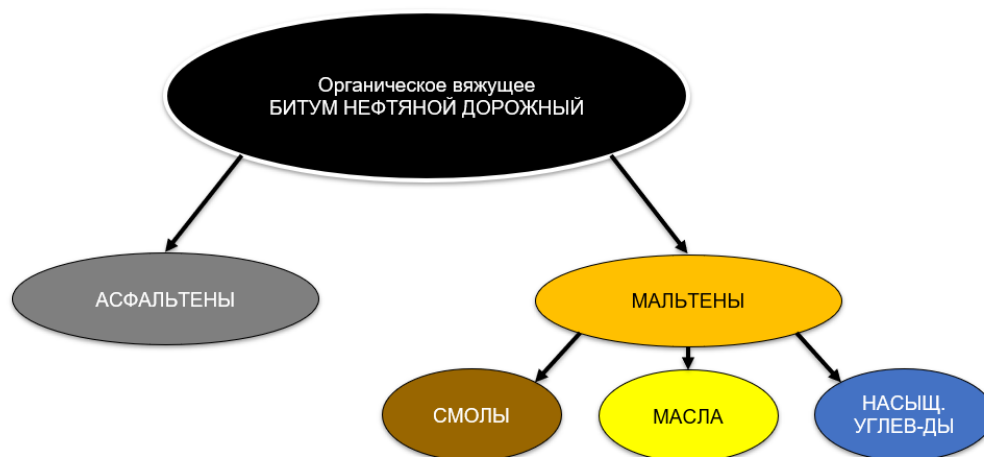


Рис. 1. Состав органического вяжущего битума нефтяного дорожного
Fig. 1. Composition of oil road bitumen

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Составы горячих полидисперсных органоминеральных композиций в мировой практике представлены в виде рационально подобранных зерновых составов минеральных материалов, таких как щебень, песок из отсева дробления горных пород, минерального порошка, природного песка, стабилизирующих добавок и ОВ – битума нефтяного дорожного различных марок (возможно модифицированного), перемешанных в нагретом состоянии. Температурные режимы и время перемешивания

всех составных частей необходимо соблюдать для равномерного распределения в «тонких пленках» и удержания ОВ на поверхности минеральных компонентов.

Все асфальтобетоны регламентированы следующими государственными стандартами: утративший силу ГОСТ 9128-2013, действующие ГОСТ Р 58406.1-2020, ГОСТ Р 58406.2-2020, ГОСТ Р 58401.1-2019, ГОСТ Р 58401.2-2019, требования которых должны быть соблюдены в части используемых вяжущих и инертных материалов, а также соответство-

вать критериям оценки определенным маркам асфальтобетонных смесей и асфальтобетон по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам⁷.

При эксплуатации автомобильной дороги покрытие испытывает негативное влияние от транспортных средств, погодно-климатических условий, осадков, реагентов, солнечной радиации и т. д., что приводит к преждевременному разрушению и износу.

При изучении структуры полидисперсных органоминеральных композиций стало известно, что крупный заполнитель в системе «органическое вяжущее – крупный заполнитель – мелкий заполнитель» выступает в роли каркаса, способствующего сопротивляться механическим воздействиям от подвижного состава [16–20].

Мелкий заполнитель совместно с ОВ является асфальтовяжущим веществом, которое отвечает за равномерное распределение во всем объеме асфальтобетонной смеси ОВ, переводя его из объемного состояния в «тонкие пленки» [21].

Немаловажным остается вопрос адгезии ОВ к минеральным материалам, в связи с однополярностью или разнополярностью инертных материалов сцепления качество асфальтобетон будет разное.

Таким образом, в силу разнообразных дорожно-климатических зон регионов и различной степени доступности сырьевых компонентов для изготовления качественных асфальтобетонных смесей, самый доступный способ регулирования физико-механических и эксплуатационных характеристик является модификация ОВ.

Полимерная модификация битумов

Полимерно-битумные вяжущие применяются достаточно обширно как на территориях России, так и за рубежом. Возможное применение полимеров в составе ОВ изучено достаточно подробно, однако, практическое применение нашли полимерные модификаторы некоторых типов, которые представлены в таб. 1.

Использование полимерных модификаторов позволяет регулировать такие характеристики битума, как эластичность, растяжимость, повышение энергии когезии, адгезии, снижение температуры хрупкости и повышение температуры размягчения, что влияет на характеристики асфальтобетон – трещиностойкость и сдвигоустойчивость, снижение

пластических деформаций.

Модификация поверхностно-активными веществами (ПАВ)

Для улучшения адгезионных свойств ОВ, а также смачиваемости в асфальтобетонной смеси, к частицам минеральных материалов применяют анионные и катионные ПАВ.

Молекулы ПАВ состоят из двух частей: полярной гидрофильной функциональной группы, которая является источником сильных межмолекулярных взаимодействий, и неполярной гидрофобной группы – углеводородного радикала, содержащего 10–18 атомов углерода.

По химическому строению ПАВ делятся на ионогенные и неионогенные. Ионогенные ПАВ в зависимости от вида образующихся при диссоциации ионов делятся на анионактивные, катионактивные и амфолитные (амфотерные):

1. В зависимости от происхождения каменных материалов и его химического состава в России преимущественно используют анионактивные ПАВ, такие как окисленный петролатум, госсиполовая кислота, синтетические жирные кислоты (СЖК), кубовые остатки СЖК, железистые соли высших карбоновых кислот, смолы каменноугольные, таловый пек и др. Обеспечивают улучшение адгезии каменных материалов карбонатных (доломит, известняк) и основных (диабаз, базальт) горных пород.

2. К представителям катионных ПАВ относятся амины, полиамины, четвертичные аммониевые основания и их соли, имидазомины, октадециламин. Они улучшают сцепление с кислыми горными породами.

3. Неионогенные ПАВ, такие как кодит, камид, эфиры полиоксиэтиленовых алкифенолов ОП-7 и ОП-10, улучшают адгезию к инертным каменным материалам карбонатных и кислых пород.

4. Деструктурирующие ПАВ – адсорбируясь на поверхности структурообразующих компонентов битума (смола и асфальтенов), происходит изменение прочности и характера взаимодействия между компонентами в битуме. Такой эффект достигается при введении высокомолекулярных аминов и диаминов. Катионные ПАВ типа высших алифатических аминов могут замедлить процесс старения битумов.

5. Структурирующие ПАВ – взаимодействие ОВ с ПАВ образует пространственную

⁷Акимова Т.Н. Асфальтобетон: учебное пособие. М.: Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)), 2020. 161 с.

дисперсную структуру, которая сопряжена с асфальтовыми комплексами битума. При оптимальной концентрации ПАВ класса же-

лезных или кальциевых солей высокомолекулярных карбоновых кислот проявляется структурообразующий эффект.

Таблица 1. Разновидность полимерных модификаторов битума [7,21]

Table 1. Variety of polymeric bitumen modifiers [7,21]

Категория	Представители	Преимущества	Недостатки
Пластомеры	Полиэтилен (PE) Полипропилен (PP)	Обладает хорошими высокотемпературными свойствами, снижает вероятность образования пластических деформаций Относительно низкая стоимость	Снижение или ограниченное улучшение эластичности Проблемы фазового разделения
	Этилен-винилацетат (EVA) Этилен-бутилакрилат (EBA)	Относительно хорошая стабильность при хранении Высокая устойчивость к колееобразованию	Ограниченное улучшение эластичного восстановления Ограниченное улучшение низкотемпературных свойств
Термопластичные эластомеры	Стирол-бутадиен-стирол (SBS) Стирол-изопрен-стирол (SIS)	Повышенная жесткость Пониженная чувствительность к температурным режимам Способность повышать эластичность	Сложность совмещения с некоторыми битумами Низкая устойчивость к нагреванию, окислению и ультрафиолету Высокая стоимость полимера и производства полимерно-битумных вяжущих
	Стирол-этилен / бутилен-стирол (SEBS)	Высокая устойчивость к нагреванию, окислению и ультрафиолету	Нестабильность в хранении Низкая эластичность Высокая стоимость
Реактопласты	Эпоксидные, карбамидные, полиэфирные и др. синтетические смолы	Деформативная и коррозионная устойчивость	Недостаточная пластичность в связи с взаимодействием с отвердителем, становится чрезмерно прочным

Технологические модифицирующие добавки

При производстве, транспортировке, укладке асфальтобетонных смесей могут возникнуть некоторые трудности, такие как температурные режимы разогрева, изготовления и укладки, дальность возки смесей от места производства до места укладки, ресурсообеспеченность качественными исходными материалами, соответствующих нормативным документам и требованиям проекта, материально-техническая база и технологичность производственных процессов и т. д. Для улучшения технологических свойств и эффективности производимых асфальтобетонных смесей

возможно применить следующие модификаторы – воски – инновационный материал, обладающий уникальными свойствами при взаимодействии с ОБ.

Классификация представлена на рис. 2. Воски и их качественные характеристики:

- органический материал с низкой температурой плавления, который затвердевает при 40 °С;
- химически воски могут быть углеводородами, спиртами, амидами или сложными эфирами жирных кислот;
- воскообразные полимеры нерастворимы в воде, но могут растворяться в органических растворителях.

Растворимость зависит от химического состава полимера, выбора растворителя и может потребовать повышенной температуры (~50–150 °C);

– воскообразные полимеры имеют высокую температуру плавления и достигают минимальной вязкости расплава на несколько градусов выше температуры расплава.

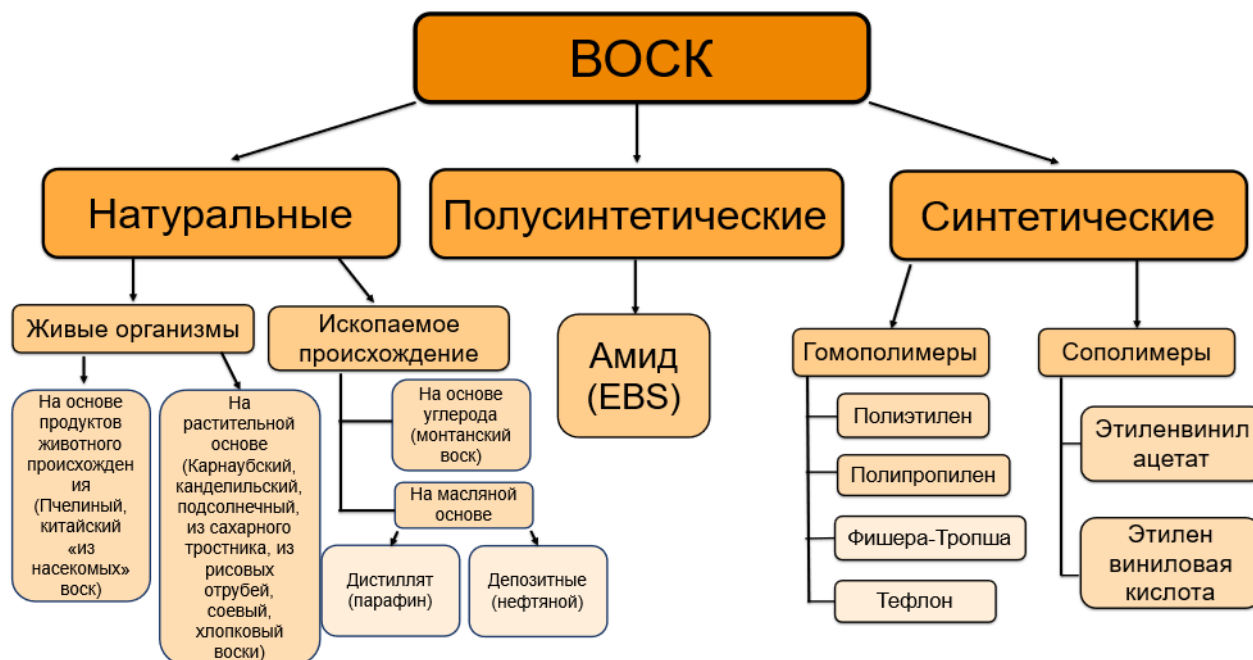


Рис. 2. Классификация восков
Fig. 2. Classification of waxes

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Обширные исследования в области модифицирования ОВ продолжают выявлять новые возможности для оптимизации состава и технологии производства асфальтобетонов с учетом региональных особенностей. Это открывает перспективы для повышения эффективности и надежности дорожного строительства, делая его более адаптивным к изменяющимся условиям эксплуатации [23–25].

Руководствуясь нормативными документами, для применения ОВ в составе асфальтобетонов, необходимо учитывать дорожно-климатическую зону и интенсивность движения автотранспорта по покрытию. Требования, предъявляемые к ОВ, представлены в ГОСТ 33133-2014⁸, ГОСТ 52056-2003⁹, ГОСТ Р 58400.1-2019¹⁰, ГОСТ Р 58400.2-2019¹¹, разнообразие показателей и характеристик ОВ позволяют оценить любой битум и соотнести его к конкретной марке. Современный вектор,

направленный на использование битумов высоких марок, не позволяет применять исходные битумы, произведенные нефтепереработчиками, т. к. доведение ОВ до требуемых физико-механических характеристик возможно только при модификации (улучшении).

Графически охарактеризовать качество битумов возможно следующим образом, как представлено в табл. 2.

Применение модифицирующих добавок позволяет значительно улучшить адгезию между битумом и крупными заполнителями, что уменьшает вероятность отделения асфальтобетона. Это особенно важно в условиях нагрузки, когда движение тяжелых транспортных средств может приводить к образованию колеи и других дефектов. Устойчивость к воздействию степи и термическому старению, которую обеспечивают добавки, способствует сохранению целостности дорожного покрытия на протяжении всего его

⁸ГОСТ 33133-2014. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования.

⁹ГОСТ 52056-2003. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия.

¹⁰ГОСТ Р 58400.1-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические требования с учетом температурного диапазона эксплуатации.

¹¹ГОСТ Р 58400.2-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом уровней эксплуатационных транспортных нагрузок.

эксплуатационного срока.

Одним из способов увеличения физико-механических и реологических характеристик асфальтобетонов является модификация битумов композициями на основе модифицированных полиолефинов. Такие продукты уже известны российскому рынку под брендами Honeywell Titan, Sasobit [26–29]. Поставки модифицирующих добавок, представленных производителей затруднительны. Для исследований был выбран аналог рассматриваемых модификаторов Plastobit, отечественного производства, который в полной мере обеспечивает улучшение физико-механических характеристик битума.

Руководствуясь действующими ГОСТ, для определения изменения физико-механических характеристик битума, были выполнены базовые испытания образцов исходного битума и модифицированного битума с разным содержанием модифицирующей добавки в количестве 1, 2 и 3 %.

При смешивании битума с модифицирующей добавкой (характеристики которых представлены в таб. 3) рабочая температура составляла $145 \pm 2^\circ\text{C}$, гомогенизация протекала при непрерывном перемешивании образца в течении 1,5 ч. Результаты базовых физико-механических характеристик представлены в таб. 4.

Таблица 2. Классификация производимых битумов, переход от ГОСТ 33133 к ГОСТ Р 58400.1
Table 2. Classification of produced bitumen, transition from GOST 33133 to GOST R 58400.1

Марки битума по PG (Performance Grade) ГОСТ Р 58400.1–2019										
-	+	34	40	46	52	58	64	70	76	82
-10		34-10	40-10	46-10	52-10	58-10	64-10	70-10	76-10	82-10
-16		34-16	40-16	46-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16	82-16
-22		34-22	40-22	46-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22	82-22
-28		34-28	40-28	46-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28	82-28
-34		34-34	40-34	46-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34	82-34
-40		34-40	40-40	46-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40	82-40
-46		34-46	40-46	46-46	52-46	58-46	64-46	70-46	76-46	82-46

Примечание:

	Исходный битум
	Качественный битум
	Требуемый модификации

Таблица 3. Характеристики используемых модифицирующих добавок Plastobit
Table 3. Characteristics of Plastobit modifying additives used

№ п/п	Наименование характеристики	Plastobit 430F
1	Вид	Сферические гранулы
2	Размер	до 2 мм
3	Цвет	белый
4	Температура каплепадения, °С, ГОСТ 6793-74	120–127
5	Динамическая вязкость при 140 °С, мПа*с, ASTM D3236	100–300
6	Пенетрация, 1/10мм, ASTM D1321	не более 3
7	Удельная плотность при 20 °С, ГОСТ 15139-69	0,95–0,96

Исходя из полученных базовых физико-механических результатов испытаний исходного и модифицированного битума, прослеживается зависимость от процента ввода в битум синтетического воска Plastobit на вязкость, температуру размягчения и динамическую вязкость.

Стоит отметить, что низкотемпературный показатель качества ОВ снижается максимум на 5°C , но остается в границах требований ГОСТ. Зависимость вязкости и температуры размягчения от ввода модифицирующей добавки в битум представлена на рис. 3. Исходя из полученных результатов лабораторных ис-

пытаний видно, что при пенетрации исходного битума ближе к нижней границе марки, в данном случае это значение 70/82, при добавлении 1,3 % Plastobit, переходит в более вязкую марку 50/70. В случае, если пенетрация будет по верхней границе марки, то можно предположить, что при аналогичной дозировке добавки битум будет оставаться в марке. Учитывая данный факт, можно выдвинуть гипотезу, которая требует подтверждения, что при незначительном вводе добавки, модифицированный битум будет лучше сопротивляться пластическим деформациям непосредственно в асфальтобетонном покрытии.

Таблица 4. Физико-механические характеристики исходного и модифицированного битума
Table 4. Physical and mechanical characteristics of initial and modified bitumen

Наименование показателя, ед. изм.	ГОСТ	Требования ГОСТ	Битум марки 70/100	Битум марки 70/100 + 1,3 % Plastobit	Битум марки 70/100 + 3,0 % Plastobit
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	33136	от 71 до 100	82	66 (на 20 %↑ вязкость)	57 (на 31 %↑ вязкость)
Температура размягчения по КиШ, °С	33142	не ниже 47	47,1	61,9 (на 30%↑ темп. разм.)	75 (на 60 %↑ темп. разм.)
Температура хрупкости, °С	33143	не выше -18	-25	-21 (на 16 %↑ темп. хруп.)	-20 (на 20 %↑ темп. хруп.)
Изменение массы образца после старения	33140	не более 0,6	0,55	0,1 (на 80 %↓)	0,27 (на 50 %↓)
Динамическая вязкость при температуре 60 °С и скорости сдвига 1,5 с после старения, ПА*с, не менее	33140 33142	не менее 220	555,38	1729,6 (в 3 раза ↑ дин. вяз.)	—

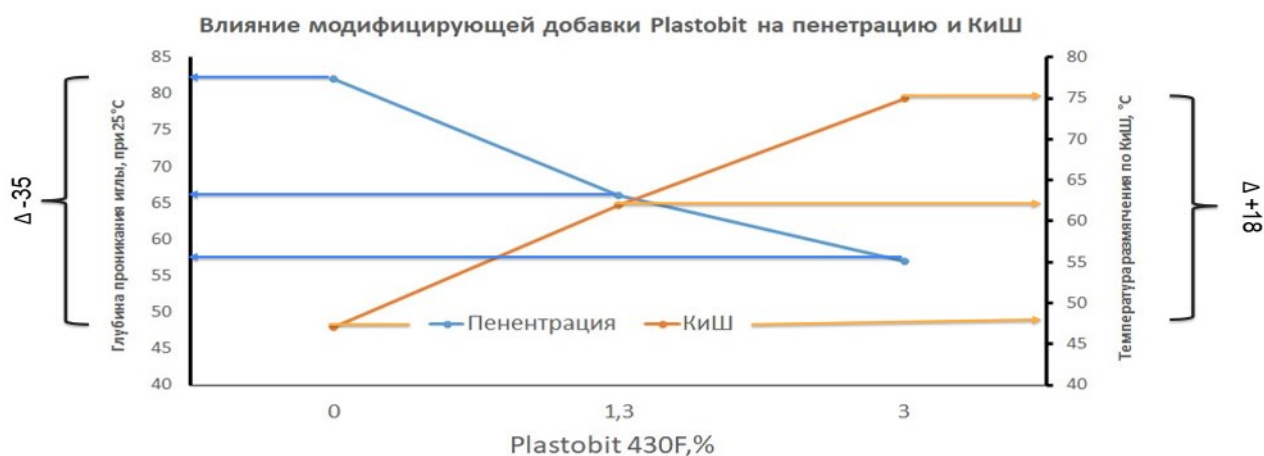


Рис. 3. Влияние модифицирующей добавки на вязкость и температуру размягчения битума по КиШ

Fig. 3. Influence of modifying additive on viscosity and softening point of bitumen by R&B

Далее, для подтверждения выдвинутой гипотезы, были выполнены лабораторные сравнительные испытания асфальтобетонных образцов на соответствие требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020, изготовленных из асфальтобетонной смеси типа А11В_н, установленного зернового состава заводом производителем. Результаты физических и эксплуатационных показателей представлены в табл. 5. Таким образом, при лабораторных испытаниях асфальтобетонных образцов

можно проследить снижение пластических деформаций по показателю средней глубины колеи, что подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии модифицирующей добавки в составе битума на эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Стоит отметить, что сравнительные испытания проводились на одном зерновом составе асфальтобетонной смеси (таб. 6), с одинаковым содержанием битума, но с разным содержанием модифицирующей добавки Plastobit.

Таблица 5. Сравнительные физические и эксплуатационные характеристики асфальтобетонных образцов с модифицирующей добавкой Plastobit
Table 5. Comparative physical and performance characteristics of asphalt concrete specimens with Plastobit modifying additive

Наименование показателя, ед. изм.	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Фактические значения на битуме марки 70/100	Фактические значения на битуме марки 70/100 + 1,3 % Plastobit	Фактические значения на битуме марки 70/100 + 3,0 % Plastobit
Объемная плотность, г/см ³	–	2,631	2,650	2,660
Коэффициент водостойкости	0,90	0,88	0,90	0,93
Средняя глубина колеи, мм	не более 4,5	3,55	1,4 (на 60 % ↓)	1,1 (на 69 % ↓)
Содержание воздушных пустот	от 2,0 до 4,5	3,17	2,50 (на 22 % ↓)	2,13 (на 33 % ↓)
Максимальная плотность, г/см ³	–	2,718	2,718	2,718

Таблица 6. Зерновой состав минеральной части асфальтобетонной смеси А11В_н
Table 6. Grain composition of the mineral part of asphalt concrete mixture A11V_n

№ п/п	Наименование	Размер зерен, мм							
		16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,125	0,063	менее 0,063
1	Частные остатки, г.	0,00	29,91	262,71	480,18	233,42	354,88	36,19	36,34
2	Частные остатки, %	0,00	1,95	17,13	31,31	15,22	23,14	2,36	8,89
3	Полные остатки, %	0,00	1,95	19,08	50,39	65,61	88,75	91,00	100,00
4	Полные проходы, %	100,00	98,05	80,92	49,61	34,39	11,25	8,89	–
5	Полные проходы рецепту	–	–	76,1–86,1	42,4–52,4	27,6–37,6	6,5–12,5	4,8–10,8	–
6	Содержание битума	5,45 сверх 100 % 5,15 в 100 % смеси							

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования по влиянию модифицирующей добавки Plastobit в битум можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что при введении модифицирующей добавки происходит изменение физико-механических характеристик таких как, уменьшается глубина проникновения иглы, увеличивается температура размягчения по КиШ, динамическая вязкость, старение битума происходит медленнее.

2. При использовании модифицированного битума в асфальтобетонной смеси уменьшаются пластические деформации, которые характеризуются показателем средней глубины колееобразования.

3. В процессе перемешивания и уплотнения образцов из асфальтобетонной смеси

наблюдается более равномерное смачивание и распределение модифицированного битума на поверхности каменного минерального материала.

Таким образом, применение модифицированного битума с добавкой Plastobit рекомендовано в районах с жарким и умеренным климатом, где вероятность экстремально низких температур стремится к нулю. Важно отметить, что использование модифицирующих добавок также положительно сказывается на экологических характеристиках асфальтобетонов.

Улучшая долговечность дорожного покрытия, они снижают необходимость в частом ремонте и реконструкции, что, в свою очередь, уменьшает выбросы CO₂ и затраты на сырьевые ресурсы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самаров А.С. Влияние заполнителей на свойства и структурообразование асфальтобетонов // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 8. С. 225–231. EDN: WOWCZU.
2. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.15862/47TVN116>. EDN: VVNSND.
3. Афанасенко А.А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности // Наука и техника. 2024. Т. 23. № 3. С. 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>. EDN: WYWGPN.
4. Тошов Д.З., Шарифов А., Шарипов Ф.Б. Активные минеральные добавки для модифицирования битума и асфальтобетона // Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. 2021. № 4. С. 107–113. EDN: LYGKDK.
5. Ковалев Д.И., Шайхутдинова Р.А. Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9. № 1. С. 1–16. <https://doi.org/10.15862/10SATS122>. EDN: TETAZJ.
6. Polacco G., Stastna J., Biondi D., Zanzotto L. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.09.001>.
7. Jiqing Zhu, Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges // European Polymer Journal. 2014. Vol. 54. P. 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
8. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Восстанавливающие и защитные материалы для обработки поверхности дорог // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2021. № 4. С. 62–71. https://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_62. EDN: CKEXKU.
9. Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Васильев Ю.Э., Менькина У.О. Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации // Вестник Московского государственного строительного университета. 2023. Т. 18. № 12. С. 1926–1936. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936>. EDN: RFJXES.
10. Xin Jin, Naisheng Guo, Zhanping You, Lin Wang, Yankai Wen, Yiqiu Tan Rheological Properties and Micro-Characteristics of Polyurethane Composite Modified Asphalt // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117395>.
11. Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Polaczyk P., Rui Xiao, Miaomiao Zhang et al. The Utilization of Waste Plastics in Asphalt Pavements: A Review // Cleaner Materials. 2021. Vol. 2. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>.
12. Song Xu, Shaoxu Cai, Runyu Huang, Kangyi Xu, Zirong Ma, Lei Fang et al. Investigation of Aging Behaviors of Asphalt Under the Coupling Conditions of Salt And Water // Fuel. 2024. Vol. 365. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131191>.
13. Zhe Lu, Zheng Feng, Zhen-gang Feng, Sicheng Liu, Si Cheng Liu, Crispino M. et al. Mechanism and Performance Evaluation of Secondary Regeneration of Asphalt // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 416. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135211>.
14. Балабанов В.Б., Молоков В.С. Оценка влияния различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 202–212. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>. EDN: NRZBHY.
15. Zhevanov V.V., Bratchun V.I., Postoenko V.A. Increasing The Fatigue Life of Asphalt Concrete by Complex Modification of Their Structure // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2023. Vol. 4. P. 70–75. EDN: DVNNDU.
16. Котлярский Э.В. Научно-методические основы оценки структурно-механических свойств композиционных материалов на основе органических вяжущих // Строительные материалы. 2011. № 10. С. 36–41. EDN: OOKVMN.
17. Губа В.В., Губа К.Р., Третьякова Л.Н. Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации // Вести Автомобильно-дорожного института. 2023. № 3. С. 17–24. EDN: QLGXDH.
18. Левкович Т.И., Воробьев Е.Г., Терешина Ю.В. Особенности структуры и свойств модифицированных асфальтобетонов и битумов // Научный альманах. 2024. № 2-3. С. 30–35. EDN: IHQPCN.
19. Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 5. С. 770–785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO.

20. Прокопец В.С., Белых И.В. Минеральный порошок и его влияние на формирование структуры асфальтобетона // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России. Материалы 65-й науч.-техн. конф. (г. Омск, 28–30 ноября 2011 г.). Омск, 2011. С. 166–171. EDN: WKSJYL.
21. Ахмадова Х.Х., Хадисова Ж.Т., Махмудова Л.Ш. Абдулмежидова З.А., Мусаева М.А. Основные способы модификации битумов различными добавками // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2019. Т. 15. № 3. С. 42–56. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2019.17.3.006>. EDN: PKSIKW.
22. Акулова М.В., Касаткина Н.К., Никитина И.В., Семенов А.Д. Модифицирующие добавки к битуму для асфальтобетонных смесей // Инженерные и социальные системы. Сб. науч. трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2021. С. 3–10. EDN: WOVFOU.
23. Горелышева Л.А. Теоретические аспекты систематизации добавок, улучшающих свойства битумного вяжущего и асфальтобетонной смеси // Дороги и мосты. 2019. № 2. С. 203–236. EDN: HSZYRN.
24. Опарина Д.В., Широкова Е.С. Оценка адгезионных свойств битума, модифицированного добавкой «HONEYWELL TITAN 7686» // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023). Сб. материалов XXIII Всеросс. (национал.) науч.-практ. конф., приуроченной к 60-летию ВятГУ (г. Киров, 12–22 июня 2023 г.). Киров, 2023. С. 199–202. EDN: LLATSB.
25. Балабанов В.Б., Джураев А.Р. Опыт применения полимера HONEYWELL TITAN 7686 для получения вяжущего с высокими физико-механическими показателями // Молодежный вестник ИргТУ. 2022. Т. 12. № 2. С. 300–305. EDN: ZWDAGY.
26. Соломенцев А.Б., Мосюра Л.С., Анахин Н.Ю., Грошев Н.Г. Исследование физико-механических свойств асфальтовяжущего с адгезионными добавками // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4. С. 124–127. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.159>. EDN: XRHHFZ.
27. Рябинина К.М., Проваторова Г.В. Исследование свойств асфальтобетона на модифицированном полимерами битуме // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 4. С. 19–29. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29>. EDN: MEGOFM.
28. Соломенцев А.Б., Мосюра Л.С. Свойства дорожного битума с адгезионными добавками различного состава // Наукоемкие технологии и инновации. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 221–226. EDN: YNKXBN.
29. Полоник В.Д., Наумова Ю.А., Люсова Л.Р., Ковалева А.Н. Модификация свойств битумных вяжущих полиэтиленовыми восками // Клеи. Герметики. Технологии. 2024. № 3. С. 10–16. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2024-0-3-10-16>. EDN: AJZYQD.

REFERENCES

1. Samarov A.S. Influence of Aggregates On Properties and Structure Formation of Asphalt Concrete. *Vestnik nauki*. 2024;4(8):225-231. (In Russ.). EDN: WOWCZU.
2. Kopylov V.E., Burenina O.N. Minerals of The Republic of Sakha (Yakutia) For Production of Asphalt-Concretes. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*. 2016;8(1):1-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/47TVN116>. EDN: VVNSND.
3. Afanasenka A.A. Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density. *Science and Technique*. 2024;23(3):235-241. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>. EDN: WYWGPN.
4. Toshov J.Z., Sharifov A., Sharipov F.B. Active Mineral Additives for Modifying Bitumen and Asphalt Concrete. *Polytechnic Bulletin. Series "Engineering Research"*. 2021;4:107-113. (In Russ.). EDN: LYGKDK.
5. Kovalev D.I., Shaykhutdinova R.A. Wheel Track Rutting Problems on Highways. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9(1):1-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/10SATS122>. EDN: TETAZJ.
6. Polacco G., Stastna J., Biondi D., Zanzotto L. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.09.001>.
7. Jiqing Zhu, Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 54. P. 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
8. Shekhovtsova S.Yu., Korolev E.V. Restorative and Protective Materials for Road Surface Treatment. *Bulletin East Siberia State University of Technology and Management*. 2021;4:62-71. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_62. EDN: CKEXKU.
9. Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Vasiliev Yu.E., Menkina U.O. Changes in The Structure and Properties of Road Bitumen During Its Thermal Stabilization. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2023;18(12):1926-1936. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936>. EDN: RFJXES.

10. Xin Jin, Naisheng Guo, Zhanping You, Lin Wang, Yankai Wen, Yiqiu Tan Rheological Properties and Micro-Characteristics of Polyurethane Composite Modified Asphalt. *Construction and Building Materials*. 2020;234:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117395>.
11. Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Polaczyk P., Rui Xiao, Miaomiao Zhang et al. The Utilization of Waste Plastics in Asphalt Pavements: A Review. *Cleaner Materials*. 2021;2:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>.
12. Song Xu, Shaoxu Cai, Runyu Huang, Kangyi Xu, Zirong Ma, Lei Fang et al. Investigation of Aging Behaviors of Asphalt Under the Coupling Conditions of Salt And Water. *Fuel*. 2024;365:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131191>.
13. Zhe Lu, Zheng Feng, Zhen-gang Feng, Sicheng Liu, Si Cheng Liu, Crispino M. et al. Mechanism and Performance Evaluation of Secondary Regeneration of Asphalt. *Construction and Building Materials*. 2024;416:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135211>.
14. Balabanov V.B., Molokov V.S. Evaluation of The Impact of Various Stabilizing Additives, Including Hydrolysis Lignin, On The Basic Physical and Operational Parameters of Rubble-Mastic Asphalt Concrete Mixtures. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):202-212. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>. EDN: NRZBHY.
15. Zhevanov V.V., Bratchun V.I., Postoenko V.A. Increasing The Fatigue Life of Asphalt Concrete by Complex Modification of Their Structure. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023;4:70-75. (In Russ.). EDN: DVNNDU.
16. Kotlyarskii E.V. Scientific and Methodological Principles for Assessing the Structural and Mechanical Properties of Composite Materials Based On Organic Binders. *Construction Materials*. 2011;10:36-41. (In Russ.). EDN: OOKVMN.
17. Guba V.V., Guba K.R., Tretiakova L.N. Changes in The Asphalt Concrete Composition, Structure and Texture During Operation. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2023;3:17-24. (In Russ.). EDN: QLGXDH.
18. Levkovich T.I., Worobjev E.G., Teresina Yu.W. Features of The Structure and Properties of Modified Asphalt Concrete and Bitumen. *Science Almanac*. 2024;2-3:30-35. (In Russ.). EDN: IHQPCN.
19. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. The Influence of Mineral Powders On the Resistance of Bitumen Binder to Thermal Deformations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(5):770-785. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO.
20. Prokopets V.S., Belykh I.V. Mineral Powder and Its Influence On the Formation of Asphalt Concrete Structure. In: *Orientirovannye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya – osnova modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksov Ros-sii. Materialy 65-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Focused Fundamental and Applied Research – The Basis for Modernization and Innovative Development of the Architectural, Construction and Road Transport Complexes of Russia. Proceedings of The 65th Scientific and Technical Conference*. 28–30 November 2011, Omsk. Omsk; 2011. p. 166–171. (In Russ.). EDN: WKSJYL.
21. Ahmadova H.H., Hadisova J.T., Mahmoudova L.H., Abdullmezhidova Z.A., Musayeva M.A. Basic Bitumen Modification Methods Various Additives. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2019;15(3):42-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2019.17.3.006>. EDN: PKSIKW.
22. Akulova M.V., Kasatkina N.K., Nikitina I.V., Semenov A.D. Modifying Additives to Bitumen for Asphalt Concrete Mixes. In: *Engineering and Social Systems. Collection of Scientific Papers of the Institute of Architecture, Construction and Transport of IVGPU*. Ivanovo: Ivanovo State Polytechnical University, 2021. p. 3–10. (In Russ.). EDN: WOVFOU.
23. Gorelysheva L.A. Theoretical Aspects of Systematization of Additives Improving Properties of Bituminous Binders and Asphalt Concrete Mixture. *Roads and Bridges*. 2019;2:203-236. (In Russ.). EDN: HSZYRN.
24. Oparina D.V., Shirokova E.S. Evaluation of The Adhesive Properties of Bitumen Modified with The Additive “HONEYWELL TITAN 7686”. In: *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii. (NPK-2023). Sbornik materialov XXIII Vserossiiskoi (natsio-nal'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi k 60-letiyu VyatGU = Society. Science. Innovations. (NPK-2023). Collection of Materials of The XXIII All-Russian (National) Scientific and Practical Conference Dedicated to The 60th Anniversary of Vyatka State University*. 12–22 June 2023, Kirov. Kirov; 2023. p. 199–202. (In Russ.). EDN: LLATSB.
25. Balabanov V.B., Dzhuraev A.R. Experience in Honeywell Titan 7686 Polymer Usage to Obtain Bituminous Binder with High Physical and Mechanical Properties. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2022;12(2):300-305. (In Russ.). EDN: ZWDAGY.
26. Solomentsev A.B., Mosyura L.S., Anahin N.Y., Groshev N.G. Study of Physical and Mechanical Properties of Asphalt Binder with Adhesive Additives. *International Research Journal*. 2017;1-4:124-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.159>. EDN: XRHHFZ.

27. Ryabinina K.M., Provatorova G.V. Investigation of The Properties of Asphalt Concrete On Polymer-Modified Bitumen. *Construction Materials and Products*. 2022;5(4):19-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29>. EDN: MEGOFM.
28. Solomentsev A.B., Mosyura L.S. Properties of Road Bitumen with Adhesive Additives of Various Compositions. In: *High-Tech and Innovation. Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference*. Belgorod: Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, 2016. p. 221–226. (In Russ.). EDN: YNKXBN.
29. Polonik V.D., Naumova Yu.A., Lyusova L.R., Kovaleva A.N. Modification of Properties of Bitumen Binders by Additives of Polyethylene Wax. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2024;3:10-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2024-0-3-10-16>. EDN: AJZYQD.

Информация об авторах**Тюрюханов Кирилл Юрьевич,**

к.т.н., доцент кафедры автомобильных дорог
и мостов,
Пермский государственный
аграрно-технологический университет
им. академика Д.Н. Прянишникова,
614045, г. Пермь, Петропавловская ул., 23,
Россия,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,
Россия,
e-mail: turuchanov.k.u@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
Author ID: 969266

Иванов Сергей Александрович,

к.т.н., доцент кафедры автомобильных дорог
и городского кадастра,
Кузбасский государственный технический
университет им. Т.Ф. Горбачева,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Россия,
✉e-mail: isa.ad@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6636-8989>
Author ID: 719226

Information about the authors**Kirill Yu. Tyuryukhanov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Highways and Bridges,
Perm National Research Polytechnic University,
23 Petropavlovskaya St., Perm 614045,
Russia,
Perm State Agrarian and Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov,
29 Komsomolsky Ave., Perm 614990,
Russia,
e-mail: turuchanov.k.u@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
Author ID: 969266

Sergey A. Ivanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Highways and Urban
Cadastre,
Kuzbass State Technical University named after
T.F. Gorbachev,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650026, Russia,
✉e-mail: isa.ad@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6636-8989>
Author ID: 719226

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regard-
ing the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.03.2025.
Одобрена после рецензирования 28.04.2025.
Принята к публикации 30.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025.
Approved after reviewing 28.04.2025.
Accepted for publication 30.04.2025.