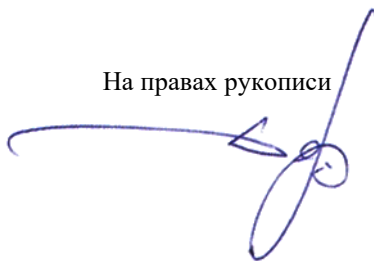


На правах рукописи



**ДЕНИСОВ ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ**

**ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОЕ ВЯЖУЩЕЕ  
С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ  
И АСФАЛЬТОБЕТОН НА ЕГО ОСНОВЕ**

**Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Белгород – 2022**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Ядыкина Валентина Васильевна**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Углова Евгения Владимировна**  
ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет», профессор ка-  
федры «Автомобильные дороги»

кандидат технических наук, доцент  
**Иноземцев Сергей Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «Национальный исследова-  
тельский Московский государственный  
строительный университет», доцент ка-  
федры «Строительное материаловедение»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государствен-  
ный технический университет»

Защита состоится «23» декабря 2022 года в 13-00 часов на заседании дис-  
сертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгород-  
ский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по ад-  
ресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белго-  
родский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и  
на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Denisov](https://gos_att.bstu.ru/dis/Denisov)

Автореферат разослан « 25 » октября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Д.Ю. Суслов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Реализуемый в настоящее время национальный проект «Безопасные и качественные дороги» включает в себя повышение требований к качеству и надежности асфальтобетонных покрытий. В частности, увеличиваются нормативные сроки службы дорожных одежд и ужесточаются требования к их транспортно-эксплуатационному состоянию. Данные требования, а также переход на объемно-функциональные методы проектирования асфальтобетонных смесей, приводят к необходимости расширенного применения полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) в дорожном строительстве. Полимерасфальтобетоны в покрытии имеют меньшую температурную зависимость прочностных и деформационных характеристик по сравнению с применением немодифицированных асфальтобетонов. Кроме того, применение ПБВ позволяет получить покрытие, сочетающее в себе высокую стойкость к накоплению пластических деформаций со значительной устойчивостью к усталостному разрушению, благодаря высокой эластичности и способности к релаксации внутренних напряжений. Использование в производстве асфальтобетонных смесей полимерно-битумных вяжущих, произведённых по традиционной технологии, связано с технологическими и экономическими сложностями и не обеспечивает требуемого качества сцепления с минеральными компонентами асфальтобетонной смеси. Кроме того, производство вяжущего в течение длительного времени при высоких технологических температурах приводит к усиленному старению, что значительно снижает срок службы такого материала в дорожном покрытии.

В связи с изложенным, разработка и применение комплексной добавки, содержащей полимер, пластификатор и поверхностно-активные вещества (ПАВ), способной распределяться в битуме без применения коллоидной мельницы, является актуальной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова; гранта Президента РФ НШ-2584.2020.8; программы развития «Приоритет-2030».

**Степень разработанности.** Применение полимерно-битумных вяжущих при строительстве асфальтобетонных покрытий осложняется необходимостью использования широкой номенклатуры оборудования, включающего коллоидные мельницы, большого емкостного парка для подготовки и дозревания вяжущего. Однако исследований, посвященных получению и применению комплексных добавок, позволяющих существенно упростить процесс получения ПБВ, в научно-технической литературе недостаточно. Также остаются не изученными вопросы, касающиеся исследования влияния подобных добавок на интенсивность старения битума в процессе приготовления ПБВ, а также на показатели, характеризующие долговечность асфальтобетона.

**Цель работы.** Разработка научно-обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой для производства асфальтобетона с улучшенными физико-механическими показателями и долговечностью.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка состава полимерно-битумного концентрата (ПБК-1), содержащего полимер, пластификатор и добавку поверхностно-активных веществ, для использования в качестве комплексной добавки при модифицировании битума;
- теоретическое обоснование и практическое подтверждение влияния рецептурно-технологических факторов приготовления полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) с использованием ПБК-1 на его свойства;
- оценка влияния полимерно-битумного вяжущего на физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона;
- технико-экономическое обоснование эффективности применения битума, модифицированного комплексной добавкой; подготовка нормативной документации для реализации результатов теоретических и экспериментальных исследований; апробация результатов исследований.

**Научная новизна.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение по получению полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой, обеспечивающее производство асфальтобетона с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. За счет модификации битума полимерно-битумным концентратом, состоящим из полимера (стирол-бутадиен-стирол (СБС)), пластификатора Унипласт-2 (включающего нефтяные и растительные масла), добавки поверхностно-активных веществ на основе азотсодержащих соединений, обеспечивается комплексное физико-химическое воздействие на структуру компонентов вяжущего, что позволяет снизить температуру и сократить время приготовления полимерно-битумного вяжущего, расширить интервал его пластичности, повысить эластичность и адгезионную способность. Применение полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой обеспечивает повышение прочности, водо- и трещиностойкости, устойчивости к колееобразованию асфальтобетона.

Предложен механизм влияния комплексной добавки, объясняющий улучшение свойств полимерно-битумного вяжущего и асфальтобетона на его основе. При введении в органическое вяжущее концентрата, присутствующий стирол-бутадиен-стирол создает пространственную структурную сетку полимера в битуме, обеспечивающую повышение эластичности и температурного интервала пластичности ПБВ. Пластификатор и добавка поверхностно-активных веществ в составе полимерно-битумного концентрата способствуют повышению гомогенности смеси, обеспечивая стабилизацию структуры вяжущего благодаря пептизации асфальтенов. В результате повышаются адгезионные свойства и стойкость к старению полученного полимерно-битумного вяжущего, что, в конечном итоге, позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона на его основе.

Установлены закономерности влияния состава и технологических режимов получения полимерно-битумного концентрата на его физико-механические характеристики, а также концентрации комплексной добавки и времени

приготовления полимерно-битумного вяжущего с ее использованием на характеристики модифицированного битума и полимерасфальтобетона, позволяющие установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов при производстве модификатора ПБК-1 и полимерно-битумного вяжущего с его использованием. Физико-химические особенности комплексной добавки и установленные параметры получения полимерно-битумного вяжущего позволяют исключить из технологических процессов многоступенчатое измельчение полимера и значительно сократить продолжительность созревания, что благоприятно сказывается на качестве получаемого продукта.

**Теоретическое и практическое значение работы.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования вяжущего и асфальтобетона на его основе при использовании полимерно-битумного концентрата, состоящего из полимера СБС, пластификатора и добавки ПАВ, в качестве модификатора битума, обеспечивающие снижение динамической вязкости полимерно-битумного вяжущего в области технологических температур, что позволило снизить температуру приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси по сравнению с традиционным ПБВ.

Предложен состав и технология производства полимерно-битумного концентрата для использования в качестве модифицирующей добавки битума.

Разработан рациональный состав и технологические параметры производства полимерно-битумного вяжущего с использованием комплексной добавки ПБК-1, позволяющие снизить температуру его приготовления на 20 °С, время – в 2 – 2,5 раза и получить материал с пенетрацией при 25 °С – 78, при 0 °С – 37, интервалом пластичности – 79 °С, эластичностью – 82%.

Разработаны составы асфальтобетонных смесей с пониженной в среднем на 20 °С температурой приготовления и уплотнения: типа А с прочностью при сжатии при  $t=0$  °С – 10,5 МПа, при  $t=20$  °С – 4,2 МПа, при  $t=50$  °С – 2,6 МПа, водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,94; ЩМА-15 с прочностью при сжатии при  $t=20$  °С – 3,5 МПа, при  $t=50$  °С – 1,35 МПа; трещиностойкостью по пределу прочности при растяжении при расколе – 4,2 МПа; водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,96; и SMA-16 с водостойкостью по методу TSR – 0,93; с выносливостью при заданном пределе деформации свыше 19000 циклов и показателем усталости не менее 4,90; глубиной колеи при стандартных условиях испытания не более 2,2 мм и интенсивностью колееобразования 0,04 мм/1000 циклов. В результате этого расчетный срок службы слоя асфальтобетонного покрытия увеличится на 4,5 года.

Разработаны программные продукты: «Вязкость» – для расчета температур эффективного смешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей; «Granlab» – для автоматизированного подбора и оптимизации гранулометрического состава асфальтобетонных смесей по объему и по массе.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой явились результаты отечественных и зарубежных ученых в области дорожно-строительного материаловедения. Определение физико-химических свойств и реологических характеристик вяжущих производилось с использованием стандартных и оригинальных методик. Однородность ПБВ оценивалась методом флуоресцентной микроскопии. Взаимодействие модифицированного вяжущего с минеральным материалом исследовалось методом ИК-спектроскопии. Исследования физико-механических свойств асфальтобетонных смесей осуществлялись согласно требованиям ГОСТ 12801-98; определение динамического модуля упругости и усталостных свойств проводилось с применением сервопневматической установки динамического нагружения (ГОСТ Р 58401.12 и ГОСТ Р 59280); определение колеестойкости выполнялось с применением установки типа «Гамбургское колесо» (ГОСТ Р 58406.3).

**Положения, выносимые на защиту:**

- технологическое решение по получению полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой, обеспечивающее производство асфальтобетона с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками;
- механизм влияния компонентов полимерно-битумного концентрата на структурообразование полимерно-битумного вяжущего и его характеристики;
- закономерности влияния состава и технологических режимов получения полимерно-битумного концентрата на его физико-механические характеристики, а также концентрации комплексной добавки и времени приготовления полимерно-битумного вяжущего с ее использованием на характеристики модифицированного битума и полимерасфальтобетона;
- рациональные составы и технологические параметры производства полимерно-битумного концентрата и полимерно-битумного вяжущего с его использованием;
- результаты исследований физико-механических и эксплуатационных характеристик асфальтобетона. Результаты апробации.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается теоретическими и экспериментальными исследованиями полимерно-битумного вяжущего и полимерасфальтобетона с применением сертифицированного и поверенного оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований. Результаты не противоречат общепринятым фактам и работам других авторов.

**Апробация работы** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных и международных конференциях: Международных молодежных форумах «Образование, наука, производство» (Белгород 2017, 2018, 2019), XXXII-ой ежегодной научной сессии Международной ассоциации исследователей асфальтобетона (Москва 2020), IX межотраслевой конференции «PRO Битум и ПБВ» (Санкт-Петер-

бург 2021), международной конференции «Органические вяжущие и асфальтобетонные смеси в дорожном строительстве» (Москва 2021), Международной научно-технической конференции молодых ученых (Белгород 2022).

**Внедрение результатов исследований.** Апробация технологии получения вяжущего и производства полимерасфальтобетона проведена в ООО «Автодорстрой-Подрядчик» при изготовлении ЩМА-15 и укладке на участке автодороги «Маслова пристань – Батрацкая дача».

Для нормативного обеспечения внедрения результатов исследований разработаны: стандарт организации СТО «Модификатор для битума «Полимерно-битумный концентрат ПБК-1». Технические условия»; технологический регламент на производство битумного вяжущего с применением модификатора ПБК-1.

Теоретические и практические результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 – «Строительство» образовательной программы «Автомобильные дороги и аэродромы»; магистров направления 08.04.01 – «Строительство» образовательной программы «Дорожно-строительные материалы и технологии» и «Автомобильные дороги»; специалистов направления 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог».

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 10 публикациях, в том числе 4 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 1 свидетельство о депонировании результатов интеллектуальной деятельности.

**Личный вклад.** Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности применения полимерно-битумного концентрата в асфальтобетонных смесях. Выполнен комплекс экспериментальных исследований с последующей обработкой и анализом полученных результатов. Произведена апробация результатов работы.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложений. Содержит 195 страниц машинописного текста, включающего 53 рисунка, 67 таблиц, библиографический список из 185 наименований, 8 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, приведена методология исследований, выносимые на защиту основные положения работы, сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов, информация об апробации работы, представлены общие данные о структуре и объеме работы

**В первой главе** изложены сведения об отечественном и зарубежном

опыте применения полимерных модификаторов различного состава для производства полимерно-битумных вяжущих, приведены теоретические сведения, обосновывающие механизмы и закономерности изменения свойств органоминеральных композитов, рассмотрены практические результаты. Приведен подробный анализ преимуществ и недостатков основных технологических решений. Проанализировано использование адгезионных добавок, рассмотрено теоретическое обоснование и практическое подтверждение механизма их влияния на свойства дорожно-строительных композитов. Рассмотрен опыт применения комбинированных модификаторов, проанализированы преимущества и недостатки их применения.

Сформулирована **рабочая гипотеза**, заключающаяся в реализации положения о возможности получения улучшенных полимерно-битумных вяжущих за счет компонентов, входящих в состав комплексной добавки, и технологических особенностей, обеспечивающих эффективное распределение полимера в системе. В качестве компонентов полимерно-битумного концентрата предложено использовать полимер стирол-бутадиен-стирол, пластификатор Унипласт-2, включающий нефтяные и растительные масла, добавку поверхностно-активных веществ на основе азотсодержащих соединений. Предполагается, что введение комплексной добавки при определенных технологических параметрах обеспечит однородность вяжущего, стабильность его структуры и свойств, повысит его адгезионную способность к минеральным материалам, замедлит интенсивность старения, что положительно отразится на качестве конечного продукта – асфальтобетона.

**Во второй главе** представлена характеристика сырьевых материалов и методы исследований вяжущих и асфальтобетонов. Для разработки комплексной добавки ПБК-1 использовались: полимер типа «стирол-бутадиен-стирол», пластификатор «Унипласт-2», добавка ПАВ на основе аминов и имидазолинов; в составе асфальтобетонных смесей: битум БНД 70/100, полимерно-битумный концентрат ПБК-1, щебень фракций, 4–8, 8–16, отсеб дробления 0–4, минеральный порошок МП-1.

**В третьей главе** приведено теоретическое обоснование влияния каждого компонента, входящего в состав комплексной добавки ПБК-1, описание подбора рецептурно-технологических факторов получения модификатора ПБК-1 и полимерно-битумного вяжущего на его основе, анализ физико-химических и реологических свойств по сравнению с ПБВ на традиционном полимере на основе стирол-бутадиен-стирола (СБС).

Для обеспечения получения эффективного однородного полимерно-битумного вяжущего необходимо, чтобы полимер в добавке был диспергирован до размера частиц, обеспечивающего стабильную структуру получаемого вяжущего во всем диапазоне технологических температур. Компоненты модификатора должны обеспечивать быстрое распределение полимера в битумной среде, стабильность полученной структуры, высокую адгезию битумного вяжущего к поверхности минеральных материалов различного генезиса, достаточную эластичность и когезионную прочность. На основании сформулированных требований подобран качественный и количественный состав модификатора ПБК-1. В качестве дисперсной фазы использовался полимер



стирол-бутадиен-стирол. Полимер диспергировался в дисперсионной среде – пластификаторе «Унипласт-2», представляющем собой смесь нефтяных масел (для обеспечения сродства с битумом и более эффективной гомогенизации модификатора в битумной среде) и растительных масел. Растительные масла, содержащие в своем составе триглицериды жирных кислот и фосфолипиды, не только обеспечивают поддержание стабильной структуры модификатора, но и выступают в роли поверхностно-активных веществ, позволяющих улучшать адгезию получаемого ПБВ как к основным, так и к кислым минеральным материалам. Введение добавки ПАВ на основе аминов и имидазолинов обеспечивает стабилизацию структуры битума из-за пептизации асфальтенов, т.е. разрушение их крупных надмолекулярных комплексов на более мелкие частицы и стабилизацию полученной структуры во времени. Благодаря этому может происходить уменьшение динамической вязкости при высоких температурах, повышение однородности и стабильности ПБВ и увеличение его стойкости к старению.

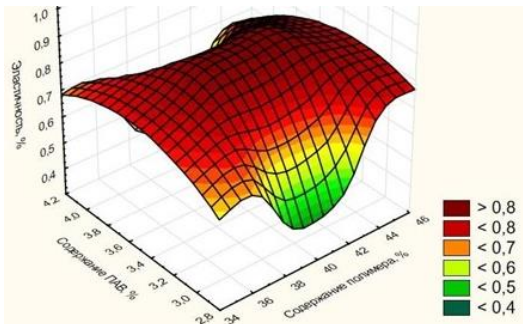
Для подбора рецептурно-технологических параметров получения модификатора ПБК-1 применялся метод четырехфакторного планирования эксперимента. В качестве функции отклика был выбран показатель эластичности добавки, определяемый при температуре 25 °С (таблица 1).

**Таблица 1** – Условия планирования эксперимента

№ п/п	Кодир. вид	Натуральный вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			–1	0	1	
1	X1	Содержание полимера, %	35	40	45	5
2	X2	Содержание добавки ПАВ, %	3	3,5	4,0	0,5
3	X3	Время перемешивания, мин	10	30	50	30
4	X4	Температура приготовления, °С	145	160	175	15

По экспериментальным данным построена математическая модель, позволяющая выявить оптимальные параметры технологических процессов и состав комплексной добавки (рисунок 1): содержание полимера – 40,0%; содержание добавки ПАВ – 3,5%; время перемешивания – 30 минут, температура приготовления – 160 °С.

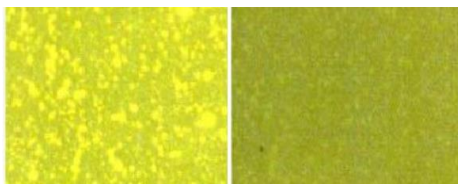
Установлено, что рациональное содержание ПБК-1 в составе полимерно-битумного вяжущего с наиболее широким температурным диапазоном пластичности составило 8%, температура приготовления –



**Рисунок 1** – Зависимость эластичности комплексной добавки от содержания полимера и ПАВ

155 °С. Время перемешивания лопастной мешалкой до однородного состояния – 15 минут, время последующего дозревания – 30 минут.

Разработана технология производства полимермодифицированного вяжущего с использованием комплексной добавки ПБК-1, преимуществами которой, по сравнению с традиционной, являются: снижение температуры разогрева битума не менее чем на 20°С, сокращение времени перемешивания вяжущего с 90 до 15 минут и времени дозревания – со 120 до 30 минут, исключение коллоидной мельницы из технологического процесса.



**Рисунок 2** – Микрофотографии ПБВ 60 (слева) и БНД70/100+8% ПБК-1 (справа)

Исследование однородности распределения полимера в вяжущем методом флуоресцентной микроскопии показало (рисунок 2), что при использовании ПБК-1 образуется однородная и более тонкодисперсная структура по сравнению с

традиционным ПБВ 60 на основе полимера типа СБС. Это является следствием пептизации асфальтенов молекулами ПАВ.

Результаты исследования характеристик вяжущих (таблица 2) свидетельствуют о том, что при введении разработанного модификатора в битум и при повышении его концентрации, снижается вязкость полученного ПБВ при 25°С (на 10–11%) и при 0 °С (на 11–46%), при этом повышается температура размягчения (на 6–14%) и снижается температура хрупкости (на 12–35%) в зависимости от концентрации добавки.

**Таблица 2** – Физико-химические характеристики исследуемых вяжущих

Показатель	БНД 70/100	Концентрация добавок, %				ПБВ 60
		4	6	8	10	
Пенетрация: при 25 °С при 0 °С	71 28	70 31	72 34	78 37	79 41	64 33
Растяжимость: при 25 °С при 0 °С	88 4,5	67 15	64 14	47 14	43 13,5	64 14
Температура хрупкости, °С	–17	–19	–20	–23	–23	–17
Температура размягчения, °С	49	52	54	56	55,2	55
Интервал пластичности, °С	66	71	74	79	77	72
Эластичность, %	нет	72	75	82	87	85
Сцепление, балл	2	4	5	5	5	3
Когезия, Н	15	16	16,2	16,5	17	17,1

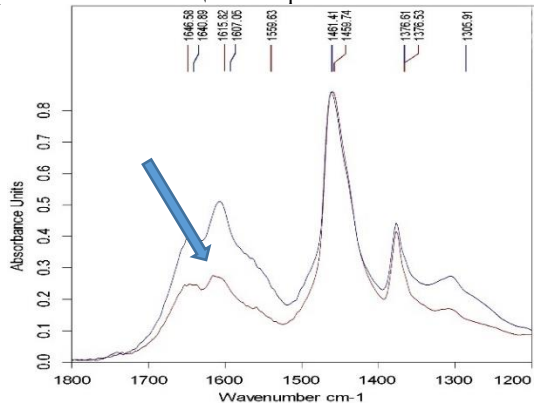
Приведенные результаты показывают, что применение ПБК-1 рациональной концентрации приводит к увеличению температурного интервала пластичности на 13 °С по сравнению с исходным битумом и на 7 °С по сравнению с ПБВ 60, то есть асфальтобетон на разработанном ПБВ может эффективно воспринимать нагрузку в большем температурном диапазоне, не вызывая пластических деформаций, но при этом не переходя в хрупкое состояние. Это позволит релаксировать возникающие в асфальтобетонном покрытии внутренние напряжения и предотвратить появление трещин.

Результаты испытаний на сцепление с гранитным щебнем показали, что адгезия модифицированного вяжущего с каменными материалами значительно возросла. Это объясняется содержанием в составе комплексной добавки поверхностно-активных веществ и подтверждается методом ИК-спектроскопии (рисунок 3). Также положительный эффект вносит снижение вязкости модифицированного битума при температуре выше 165 °С, благодаря чему процесс смачивания поверхности минерального материала происходит эффективнее.

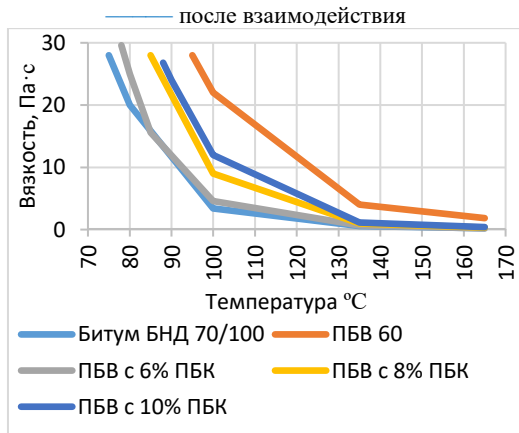
Установлено также, что увеличение концентрации добавки ПБК-1 в составе вяжущего сопровождается ростом когезионной прочности вяжущего (на 7–13%), что положительно отразится на свойствах асфальтобетона.

Ключевое технологическое свойство битумного вяжущего – динамическая вязкость (рисунок 4).

Из представленных результатов видно, что в области технологических температур (135–165 °С) вязкость битума, модифицированного ПБК-1, на 59 %



**Рисунок 3** – ИК-спектры битума с добавкой ПАВ  
— до взаимодействия с минеральной поверхностью



**Рисунок 4** – Динамическая вязкость модифицированного ПБК-1 вяжущего, исходного битума и ПБВ 60 при различных температурах

меньше, чем ПБВ 60, и соответствует вязкости битума БНД 70/100. Следовательно, при использовании вяжущего с ПБК-1 уменьшаются энергетические затраты на его перекачивание по трубопроводам асфальтобетонного завода и снизится температура перемешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси по сравнению с ПБВ 60. При снижении температуры измерения до границ, приближающихся к эксплуатационным температурам, наблюдается значительный рост вязкости модифицированного битума, что положительно отразится на тепло- и сдвигоустойчивости асфальтобетона.

Для прямой оценки функциональных свойств получаемого битумного вяжущего с модификатором ПБК-1 применялись методы испытаний по требованиям объемно-функционального проектирования. Оценивался верхний предел пластичности битума (по потере сдвиговой устойчивости) и нижний температурный предел пластичности (по достижению максимально допустимой жесткости и фактическому растрескиванию вяжущего) (таблица 3). Кроме того, практический интерес представляет классификация получаемого вяжущего по марке РГ и сравнение получаемой марки с исходным битумом и ПБВ 60 заводского производства.

**Таблица 3** – Реологические свойства модифицированного вяжущего

Показатель	Ед. изм	Битум + ПБК-1	БНД 70/100	ПБВ 60
Динамическая вязкость при 165 °С	Па×с	0,082	0,124	1,89
Динамическая вязкость при 135 °С	Па×с	0,287	0,411	2,65
Устойчивость к сдвигу при температуре	кПа	1,12	1,90	1,36
	°С	64	52	64
Критическая низкая температура	°С	–28,77	–19,01	–12,24
Критическая температура растрескивания	°С	–31,16	–21,1	–25,4
Сопrotивление усталости	кПа	3832	1503	1420
Марка по ГОСТ Р 58400.1	-	64–28	52–16	64–22

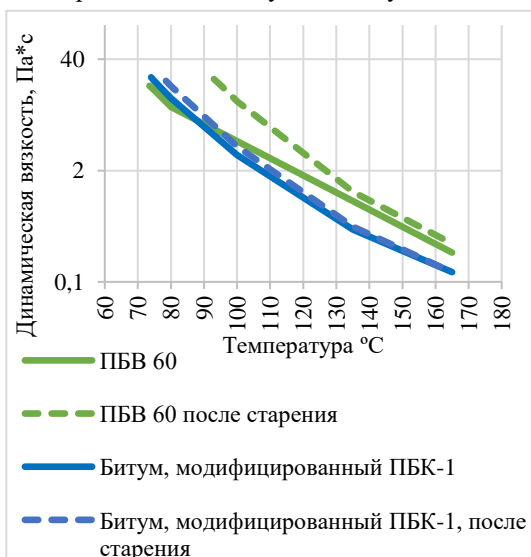
Приведенные результаты свидетельствуют о положительном воздействии модификатора на свойства битума. Высокий показатель сопротивления усталости (3832 Па) позволяет прогнозировать большую стойкость битума, модифицированного ПБК-1, к многократно прикладываемым нагрузкам по сравнению с ПБВ 60 заводского производства. Также установлено, что ПБВ с ПБК-1 гораздо эффективнее работает в области низких температур, о чем свидетельствует понижение температуры хрупкости по Фраасу и значительное снижение критической низкой температуры по показателю ползучести. Следует отметить, что по высокотемпературным свойствам получаемое вяжущее не уступает ПБВ заводского приготовления. Вяжущее, полученное с применением ПБК-1 имеет марку РГ 64-28, испытанный заводской аналог – РГ 64-22, а битум БНД 70/100 до модификации соответствует марке 52-16. Таким образом, исследуемое вяжущее имеет температурный диапазон пластического состояния 92 °С, в то время как данный параметр для заводского аналога составляет 86 °С.

Разработанная технология с применением полимерно-битумного концентрата позволяет снизить температуру и сократить время производства ПБВ. Закономерно предположить, что это приведет к меньшему старению вяжущего, а, следовательно, положительно отразится на его долговечности. Кроме того, применяемые в составе модификатора азотсодержащие ПАВ являются ингибитором старения. Исследование интенсивности старения проводилось путем выдерживания образцов вяжущего в тонком слое в устройстве TFOT в течение 5 часов при температуре 165 °С. Результаты определения физико-химических характеристик исходного вяжущего после старения показали, что изменение глубины проникания иглы при 25 °С битума после старения составило 45%, тогда как модифицированного – 10%. Температура размягчения исходного вяжущего возросла на 13%, а битума с ПБК-1 на 4%, растяжимость – на 73 и 44% соответственно.

ИК-спектроскопические исследования показали, что интенсивность полосы поглощения  $1700\text{ см}^{-1}$ , соответствующей группам  $\text{C}=\text{O}$ , составляет для исходного состаренного битума 0,121, тогда как для модифицированного – 0,105, т.е. деструктивные процессы затрагивают исследуемое вяжущее значительно меньше.

Для анализа влияния процессов термоокислительной деструкции на реологические характеристики, модифицированное вяжущее также старилось в тонком слое в течение 85 минут при температуре 165 °С при непрерывной подаче воздуха со скоростью 4 л/мин в устройстве RTFOT. Кривые изменения динамической вязкости полимерно-битумных вяжущих (рисунок 5), свидетельствуют о том, что битум, модифицированный ПБК-1, имеет более стабильные реологические характеристики по сравнению с ПБВ заводского производства.

Результаты исследования характеристик битумного вяжущего, модифицированного добавкой ПБК-1, полностью подтвердили выдвинутую рабочую гипотезу. Получено однородное ПБВ с высоким показателем эластичности и интервалом пластичности, сцеплением с минеральным материалом, стойкое к термоокислительной деструкции, что должно положительно отразиться на физико-механических характеристиках асфальтобетона



**Рисунок 5** – Изменение динамической вязкости образцов вяжущих после старения

и его эксплуатационной надежности как под действием погодных-климатических факторов, так и при воздействии транспортной нагрузки.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований физико-механических и эксплуатационных свойств асфальтобетонных смесей с применением разработанного вяжущего. Для проведения сравнительных испытаний были выбраны следующие асфальтобетонные смеси: тип А I марки по ГОСТ 9128, ЩМА-15 по ГОСТ 31015 и SMA-16 по ГОСТ 58401.2 (таблицы 4, 5).

**Таблица 4** – Результаты испытаний асфальтобетонных образцов типа А

Показатели	Нормативные требования по ГОСТ 9128	Вид вяжущего	
		БНД 70/100	Битум+ПБК-1
Предел прочности при сжатии при температуре: 0 °С, МПа	Не более 11,00	11,8	10,5
20 °С, МПа	Не менее 2,5	3,7	4,2
50 °С, МПа	Не менее 1,2	1,9	2,6
Водостойкость	не менее 0,90	0,90	0,98
В т.ч. при длительном водонасыщении	Не менее 0,85	0,81	0,94
Коэффициент внутреннего трения асфальтобетона, tg φ	Не менее 0,87	0,88	0,87
Лабораторный показатель сцепления при сдвиге Сл, МПа	Не менее 0,25	0,39	0,45

**Таблица 5** – Результаты испытаний асфальтобетонных образцов SMA-16

Показатели	Нормативные требования по ГОСТ 58401.2	Вид вяжущего	
		ПБВ 60	Битум+ПБК-1
Содержание воздушных пустот, %	4±0,3	4,1	4,1
Содержание пустот в минеральном заполнителе, %	Не менее 17	18,5	18,5
Стекание вяжущего, %	Не более 0,3	0,20	0,20
Предел прочности TSR, КПа	Не нормируется	368,05	471,14
Водостойкость TSR	Не менее 0,80	0,81	0,93

Для расчета температурного диапазона смешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей в зависимости от реологических характеристик вяжущего разработан специализированный математический инструмент, который лег в основу программного продукта (приложение для Windows) «Вязкость» (свидетельство о депонировании №219.017.52AE).

Асфальтобетон типа А на разработанном вяжущем характеризуется увеличенным пределом прочности при сжатии, повышенной сдвигоустойчивостью и возросшей водостойкостью. При этом, высокое значение водостойкости относительно образцов на контрольном вяжущем фиксируется при длительном водонасыщении продолжительностью до 90 суток.

Результаты испытаний асфальтобетонной смеси SMA-16 показывают, что по прочности при непрямом растяжении и водостойкости образцы на исследуемом вяжущем превосходят контрольные образцы на ПБВ 60 заводского производства.

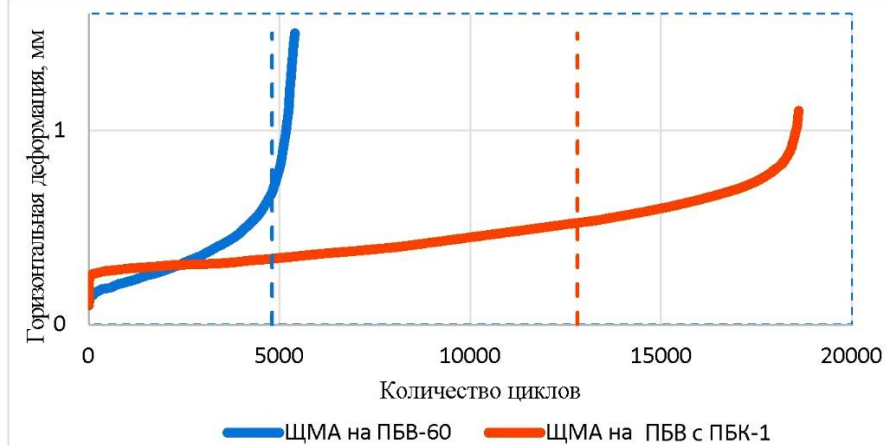
Высокие физико-механические характеристики исследуемых асфальтобетонных смесей объясняются расширением интервала пластичности модифицированного вяжущего, уменьшением интенсивности старения в процессе приготовления асфальтобетонной смеси, лучшим смачиванием поверхности минерального материала, увеличенной адгезией и когезионной прочностью.

Проведены исследования эксплуатационной надежности асфальтобетонных смесей с модификатором ПБК-1 и определены расчетные показатели модифицированного асфальтобетона. Важнейшими характеристиками асфальтобетона для расчета конструкции дорожных одежд считаются показатели модулей упругости, усталостной долговечности, а также способность сопротивления к накоплению остаточных деформаций (таблица 6).

**Таблица 6** – Расчетные динамические модули упругости асфальтобетона

Показатели	Динамический модуль упругости, МПа					
	при сжатии					при растяжении
Температура испытания, °С	10	20	30	40	50	10
SMA-16 на БНД 70/100	8608	5257	2631	1148	739	7288
SMA-16 на ПБВ 60	9350	5819	3409	1718	1038	10124
SMA-16 на БНД 70/100+ПБК-1	9286	5530	3250	1569	949	8642

Модули упругости асфальтобетона на разработанном вяжущем, полученные при различных температурах, выше, чем на исходном битуме, и приближаются к таковым значениям, полученным на ПБВ заводского приготовления.



**Рисунок 6** – Разрушение образцов SMA-16 на ПБВ 60 и БНД 70/100+ПБК-1 под действием многократного нагружения

Результаты испытаний на усталостную долговечность (рисунок 6) демонстрируют, что снижение жесткости до 50% образца асфальтобетона на разрабатанном вяжущем, происходит в 1,7 раза дольше, а его полное разрушение наблюдается в 2,4 раза позже, чем контрольного образца.

Кроме того, необходимо обратить внимание на динамику нарастания усталостных напряжений. Из рисунка видно, что 50% потери жесткости асфальтобетона на ПБК-1 приходится на 70% общего числа приложений нагрузки, в то время как на контрольном образце жесткость падает более интенсивно. Потеря 50% жесткости происходит при 90% всех приложений нагрузки, то есть незадолго до его разрушения.

Показатель усталости в случае применения модификатора ПБК-1 увеличивается на 96%, тогда как ПБВ дает прирост лишь на 20%.

Повышение модуля упругости во всем диапазоне исследуемых температур как при статической, так и динамической нагрузке, свидетельствует об эффективности применения комплексного модификатора, а существенное увеличение показателя усталостной долговечности значительно расширяет срок эксплуатации покрытия. В случаях применения исследуемого модификатора в нижних слоях покрытия и верхних слоях основания следует ожидать увеличенного расчетного срока службы конструкции в целом.

Серьезной проблемой эксплуатации автомобильных дорог с большими осевыми нагрузками является колееобразование. Проведены испытания подобранных составов SMA-16 на битуме, модифицированном ПБК-1, и на контрольном вяжущем марки ПБВ 60 на устойчивость к образованию колеи, которые позволяют прогнозировать срок службы асфальтобетонного покрытия.

**Таблица 7 – Показатели колеестойкости**

Вид вяжущего	Интенсивность образования колеи, мм/1000 циклов	Глубина колеи, мм	Пропорциональная глубина колеи, %
ПБВ 60	0,07	2,5	6,3
БНД 70/100+ПБК-1	0,04	2,2	5,4

Установлено, что устойчивость к накоплению остаточных деформаций ЩМА на ПБВ с модификатором ПБК-1 превышает аналогичные значения асфальтобетона на ПБВ 60 в части интенсивности ее образования на 75% (таблица 7). Это означает, что критически допустимая колея будет достигнута значительно позже, в результате чего ожидаемый срок службы слоя асфальтобетонного покрытия увеличится на 4,5 года.

Таким образом, в результате применения полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой, возможно получение асфальтобетонной смеси при температурах, необходимых при использовании немодифицированного вяжущего, что значительно ниже, чем при приготовлении смеси на ПБВ 60 заводского производства. При этом эксплуатационные характеристики асфальтобетона превышают значения показателей как асфальтобетона на немодифицированном вяжущем, так и на контрольном ПБВ 60.



В пятой главе разработаны нормативно-технические документы для внедрения предложенных технологических решений, представлены результаты апробации, произведен расчет экономической и экологической эффективности предлагаемой технологии.

За счет меньших энергозатрат на производство вяжущего, а также снижения температуры производства асфальтобетонной смеси, экономия по себестоимости смеси на ПБК-1 составила 15,67% по сравнению с традиционным ПБВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования вяжущего и асфальтобетона на его основе при использовании полимерно-битумного концентрата, состоящего из полимера СБС, пластификатора и добавки ПАВ, в качестве модификатора битума, обеспечивающего снижение температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси по сравнению с традиционным ПБВ.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение по получению полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой, обеспечивающее производство асфальтобетона с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. За счет модификации битума полимерно-битумным концентратом, состоящим из полимера (стирол-бутадиен-стирол (СБС)), пластификатора Унипласт-2 (включающего нефтяные и растительные масла), добавки поверхностно-активных веществ на основе азотсодержащих соединений, обеспечивается комплексное физико-химическое воздействие на структуру компонентов вяжущего, что позволяет снизить температуру и сократить время приготовления полимерно-битумного вяжущего, расширить интервал его пластичности, повысить эластичность и адгезионную способность. Применение полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой обеспечивает повышение прочности, водо- и трещиностойкости, устойчивости к колееобразованию асфальтобетона.

Предложен механизм влияния комплексной добавки, объясняющий улучшение свойств полимерно-битумного вяжущего и асфальтобетона на его основе. При введении в органическое вяжущее концентрата, присутствующий стирол-бутадиен-стирол создает пространственную структурную сетку полимера в битуме, обеспечивающую повышение эластичности и температурного интервала пластичности ПБВ. Пластификатор и добавка поверхностно-активных веществ в составе полимерно-битумного концентрата способствует повышению однородности смеси, обеспечивая стабилизацию структуры вяжущего благодаря пептизации асфальтенов. В результате повышаются адгезионные свойства и стойкость к старению полученного полимерно-битумного вяжущего, что в конечном итоге, позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона на его основе.

Установлены закономерности влияния состава и технологических режимов получения полимерно-битумного концентрата на его физико-механические характеристики, а также концентрации комплексной добавки и времени

приготовления полимерно-битумного вяжущего с ее использованием на характеристики модифицированного битума и полимерасфальтобетона, позволяющие установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов при производстве модификатора ПБК-1 и полимерно-битумного вяжущего с его использованием.

Предложен состав и технология производства полимерно-битумного концентрата для использования в качестве модифицирующей добавки битума.

Разработан рациональный состав и технологические параметры производства полимерно-битумного вяжущего с использованием комплексной добавки ПБК-1, позволяющие снизить температуру его приготовления на 15–20 °С, время – в два раза и получить материал с пенетрацией при 25 °С – 78, при 0 °С – 37, интервалом пластичности – 79 °С, эластичностью – 82%.

Разработаны составы асфальтобетонных смесей с пониженной в среднем на 20 °С температурой приготовления и уплотнения: типа А с прочностью при сжатии при  $t=0$  °С – 10,5 МПа, при  $t=20$  °С – 4,2 МПа, при  $t=50$  °С – 2,6 МПа, водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,94; ЩМА-15 с прочностью при сжатии при  $t=20$  °С – 3,5 МПа, при  $t=50$  °С – 1,35 МПа; трещиностойкостью по пределу прочности при растяжении при расколе – 4,2 МПа; водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,96; и SMA-16 с водостойкостью по методу TSR – 0,93; с выносливостью при заданном пределе деформации свыше 19000 циклов и показателем усталости не менее 4,90; глубиной колеи при стандартных условиях испытания не более 2,2 мм и интенсивностью колееобразования 0,04 мм/1000 циклов. В результате этого расчетный срок службы слоя асфальтобетонного покрытия увеличится на 4,5 года.

Разработаны программные продукты: «Вязкость» – для расчета температур эффективного смещения и уплотнения асфальтобетонных смесей; «Granlab» – для автоматизированного подбора и оптимизации гранулометрического состава асфальтобетонных смесей по объему и по массе.

Для обеспечения внедрения результатов исследований разработаны: стандарт организации СТО «Модификатор для битума «Полимерно-битумный концентрат ПБК-1». Технические условия»; технологический регламент на производство битумного вяжущего с применением модификатора ПБК-1.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения при производстве асфальтобетонных смесей для нижних и верхних слоев покрытия, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Перспективы дальнейших исследований** включают в себя исследования влияния добавки ПБК-1 на свойства битумов различных структурных типов, оптимизацию качественного и количественного состава модификатора с целью получения битумных вяжущих различных марок по классификации

ГОСТ 58400 и ГОСТ Р 52056, исследование перспектив применения модификатора для выпуска битумных материалов широкого спектра.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

### *В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК*

1. Траутвайн, А.И. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Supergrave / А.И. Траутвайн, А.Е. Акимов, **В.П. Денисов**, М.В. Лашин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – №3. – С. 8-13.
2. **Денисов, В.П.** Разработка математического инструмента расчета температуры смешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси **Денисов В.П.**, Траутвайн А.И., Яковлев Е.И. / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – №8. – С. 8-13.
3. Ядыкина, В.В. Старение битума, модифицированного полимернобитумным концентратом / В.В. Ядыкина, **В.П. Денисов**, А.Е. Акимов // Известия вузов. Строительство – 2022. – №1. – С. 22-30.
4. **Денисов, В.П.** Повышение эксплуатационной надежности асфальтобетона за счет применения полимерно-битумного концентрата / **В.П. Денисов**, А.Е. Акимов, В.В. Ядыкина, А.М. Гридчин // Системные технологии – 2022. – №43. – С. 5-11.

### *В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus*

5. Vysotskaya, M.A. PMB quality problems based on its morphology and used equipment / Marina Vysotskaya, Evgeniy Kharlamov, **Vasily Denisov** and Anastasiya Kurlykina // E3S Web of Conferences 135, 03035 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503035>.
6. **Denisov, V.P.**, The advantages of using polymer-bituminous concentrate for the production of polymer-bituminous binders / **Denisov V.P.**, Akimov A.E., Yadykina V.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Buildintech BIT 2020. Innovations and technologies in construction. 2020. C. 012050.

### *В сборниках трудов конференций*

7. **Денисов, В.П.** Использование математических методов при определении вязкости органических вяжущих. Ежегодная научная сессия Ассоциации исследователей асфальтобетона: сборник докладов / МАДИ. – М.: Техполиграфцентр, 2020. С. 117-124.
8. **Денисов, В.П.** Разработка состава комплексной добавки для полимерно-битумного вяжущего / **В.П. Денисов** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых: сборник докладов БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2022. – С. – 319-323.
9. **Денисов, В.П.** Влияние полимерно-битумного вяжущего с комплексной добавкой на характеристики асфальтобетона/ **В.П. Денисов** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых: сборник докладов БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2022. – С. 323-327.

***Объект интеллектуальной собственности***

10. Свидетельство о депонировании результата интеллектуальной деятельности № 219.017.52AE Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Вязкость» / **Денисов В.П.**; дата публикации 16.05.2019 – 1 с.

**ДЕНИСОВ ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ**

**ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОЕ ВЯЖУЩЕЕ  
С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ  
И АСФАЛЬТОБЕТОН НА ЕГО ОСНОВЕ**

Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 20.10.2022  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 120 экз. Заказ 106  
Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46